



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES**

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO DIMENSIONAMENTO DE  
SISTEMAS DE COBERTURA PARA RESERVATÓRIOS DE  
DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO**

**LUCAS BARROS DUARTE**

**Belo Horizonte, 22 de agosto de 2012**

Lucas Barros Duarte

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO DIMENSIONAMENTO DE  
SISTEMAS DE COBERTURA PARA RESERVATÓRIOS DE  
DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof<sup>o</sup> Lúcio Flávio de Souza Villar

Coorientador: Prof<sup>o</sup> Roberto Francisco de Azevedo

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG

2012

D812a Duarte, Lucas Barros  
Avaliação numérica do dimensionamento de sistemas de cobertura para reservatórios de disposição de resíduos de mineração [manuscrito] / Lucas Barros Duarte. — 2012.  
123 f., enc. : il.

Orientador: Lúcio Flávio de Souza Villar.  
Coorientador: Roberto Francisco de Azevedo.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 116-123.

1. Mecânica do solo – Teses. 2. Resíduos de mineração – Teses. 3. Fechamento de minas – Teses. 4. Minas – Drenagem – Teses. I. Villar, Lúcio Flávio de Souza. II. Azevedo, Roberto Francisco de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624.13 (043)



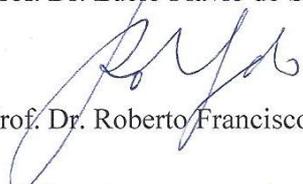
FOLHA DE APROVAÇÃO

"Avaliação numérica do dimensionamento de sistemas de cobertura para reservatórios de disposição de resíduos de mineração"

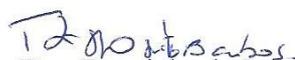
**Lucas Barros Duarte**

Dissertação defendida e aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Senhores:

  
Prof. Dr. Lúcio Flávio de Souza Villar

  
Prof. Dr. Roberto Francisco de Azevedo

  
Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões

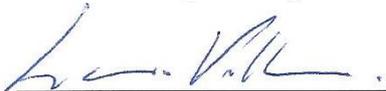
  
Profa. Dra. Terezinha de Jesus Espósito Barbosa

  
Eng. Aloysio Portugal Maia Saliba

Aprovada pelo Colegiado do Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes

  
Prof. Gustavo Ferreira Simões  
Coordenador

Versão Final aprovada por



Prof. Lúcio Flávio Ferreira Simões  
Orientador

Belo Horizonte, 22 de agosto de 2012.

*À MINHA ESPOSA BÁRBARA*

*pela companhia sempre agradável e interessante seja em casa, viagens ou festivais...  
por se lixar para valores medíocres  
e pelo apoio ao meu esforço em conciliar ser um marido dedicado e um geotécnico atencioso.*

*AOS MEUS PAIS ZEZÉ E CIDA*

*pela presença sempre atuante independente da distância,  
por me ensinarem que presentes e carinhos não são exclusivos de datas comerciais  
e por provarem que caráter não é atestado por diploma.*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Lúcio que me recrutou na geotecnia durante a graduação e que, desde então, me orientou *ativamente* como graduando, bolsista, geotécnico e agora como mestrando. Esta convivência me empurrou para a busca do além do conteúdo dado de sala de aula. Reconheço sua saudável influência e agradeço.

Ao Fernando Junqueira pelo apoio *incrivelmente* presente e cordial. Exponho meu reconhecimento pelo seu interesse na realização deste trabalho, pelo respeito às minhas dúvidas e por compartilhar seus conhecimentos sem nenhuma censura.

Ao Rafael Jabur, José Bernardo, Gilson Furtado e Daniel Penna pelos meus primeiros fundamentos em geotecnia aplicada à mineração e pelas conversas amigáveis durante os trabalhos de campo.

Aos colegas Aloysio Saliba (engenheiro hidrólogo), Fernando Pantuzzo (geoquímico), Luciano Santos (químico) e Thiago Alves (biólogo) pelas contribuições nesta dissertação em suas respectivas áreas de atuação.

À secretária do curso de mestrado Kátia por tornar os processos de matrícula, obtenção de informações e documentações tão transparentes e tranquilos.

À AngloGold pela gentil autorização para utilização dos resultados de sua estação meteorológica.

À FAPEMIG por viabilizar a execução dos ensaios realizados no Laboratório de Geotecnia da UFMG.

À Waters/Gilmour/Wright/Mason pela inspiração e pelo fundo musical nas horas dedicadas à composição desta dissertação.

Ao Gael que, sem dúvida, foi minha maior motivação para avançar e concluir este trabalho.

# SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE GRÁFICOS .....	xi
LISTA DE TABELAS .....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xiv
RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Importância e aplicabilidade do estudo .....	1
1.2 Objetivos desta pesquisa .....	3
1.3 Organização do trabalho .....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Introdução .....	5
2.2 Lixiviação de metais e drenagem ácida de mina .....	6
2.2.1 Lixiviação de metais .....	6
2.2.2 Drenagem ácida de mina (DAM) .....	7
2.2.3 Principais minerais geradores de DAM .....	7
2.2.4 Métodos de investigação .....	8
2.2.5 Técnicas tratamento .....	9
2.2.6 Técnicas de prevenção .....	10
2.3 Cobertura com solo para depósitos de resíduos de mineração .....	10
2.3.1 Tipos de coberturas com solo .....	10
2.3.1.1 Camada superficial .....	11
2.3.1.2 Cobertura de armazenamento e liberação de água .....	11
2.3.1.3 Cobertura de barreira capilar .....	12
2.3.1.4 Camada de barreira hidráulica .....	13
2.3.2 Tipos de sistemas de coberturas feitos com solo .....	14
2.3.2.1 Sistemas de coberturas convencionais .....	14
2.3.2.2 Sistemas de coberturas evapotranspirativas .....	15
2.3.3 Influência do clima local na escolha do sistema de cobertura .....	18

2.4	Vegetação em projetos de cobertura.....	18
2.4.1	Seleção da vegetação apropriada.....	19
2.4.2	Consumo de água pelas plantas.....	20
2.4.3	Profundidade das raízes.....	21
2.4.4	Índice de área foliar.....	21
2.4.5	Ponto de murcha.....	22
2.5	Metodologias para dimensionamento de coberturas.....	22
2.5.1	Metodologia proposta por Junqueira <i>et al.</i> (2011a).....	23
2.5.1.1	Planejamento.....	24
2.5.1.2	Seleção de áreas de empréstimo e investigações de campo.....	25
2.5.1.3	Ensaio de laboratório.....	25
2.5.1.4	Modelagem e projeto.....	26
2.5.1.5	Uso de células teste - escala de campo.....	26
2.5.2	Metodologia proposta por ITRC (2003).....	27
2.5.2.1	Critérios de desempenho da cobertura.....	27
2.5.2.2	Projeto preliminar/conceitual.....	27
2.5.2.3	Caracterização local.....	28
2.5.2.4	Análise de sensibilidade através de modelagem numérica.....	28
2.5.2.5	Projeto final.....	29
2.5.3	Metodologia proposta por Ribeiro (2011).....	30
2.6	Discussão sobre utilização de ensaios de coluna.....	31
2.7	Desempenho em longo prazo.....	32
2.8	Estudos já realizados para utilização do rejeito como material de cobertura.....	34
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO PROBLEMA.....	35
3.1	Mecânica dos solos não saturados.....	35
3.1.1	Fases constituintes dos solos não saturados.....	36
3.1.2	Sucção.....	37
3.1.2.1	Componentes da sucção.....	37
3.1.2.2	Métodos para medição da sucção.....	39
3.1.2.3	Curva de retenção de umidade.....	40
3.1.2.4	Ajustes dos pontos obtidos em ensaios.....	41
3.1.2.5	Função da permeabilidade não saturada.....	44
3.1.2.6	Determinação da curva de retenção de umidade a partir da curva granulométrica.....	46
3.2	Cálculo do fluxo de umidade no solo não saturado.....	48

3.3	Cálculo do fluxo de calor no solo .....	50
3.4	Cálculo da evaporação .....	51
3.5	Cálculo da transpiração.....	53
3.6	Soluções numéricas .....	54
3.6.1	Apresentação do SoilCover .....	55
3.6.2	Apresentação do VADOSE/W .....	55
3.6.3	Parâmetros de entrada dos programas .....	56
3.6.4	Parâmetros de saída .....	58
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
4.1	Estudo de caso .....	59
4.1.1	Planejamento .....	59
4.1.2	Ensaio de laboratório .....	60
4.1.3	Modelagem e projeto.....	65
4.1.3.1	Tempo da análise .....	65
4.1.3.2	Parâmetros climáticos .....	66
4.1.3.3	Geometrias .....	69
4.1.3.4	Malha de elementos finitos .....	71
4.1.3.5	Parâmetros de vegetação.....	72
4.1.4	Parâmetros térmicos .....	73
4.1.5	Uso de células teste em escala de campo .....	73
4.2	Análises de sensibilidade nos resultados .....	74
4.2.1	Objetivo .....	74
4.2.2	Metodologia adotada .....	74
4.2.2.1	Alteração no período da análise.....	75
4.2.2.2	Alteração dos métodos de obtenção ou de tratamento dos parâmetros .....	75
4.2.2.3	Variação da magnitude dos parâmetros .....	84
4.2.3	Alteração dos dados climáticos .....	86
4.2.3.1	Clima tropical úmido .....	86
4.2.3.2	Clima semi-árido .....	86
4.3	Utilização de rejeito como material de cobertura .....	87
4.3.1	Condicionantes para utilização do rejeito como material de cobertura.....	88
4.3.1.1	Análise do comportamento geoquímico do rejeito .....	88
4.3.1.2	Análise dos parâmetros geotécnicos do rejeito.....	89
4.3.1.3	Análise de viabilidade econômica .....	89

4.3.2	Simulação de utilização de diferentes tipos de rejeito como material de construção de cobertura.....	90
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	95
5.1	Resultado do estudo de caso .....	95
5.2	Resultado das análises de sensibilidade.....	100
5.2.1	Alteração no período da análise .....	100
5.2.2	Alteração dos métodos de obtenções ou tratamento dos parâmetros .....	101
5.2.3	Variação da magnitude dos parâmetros.....	103
5.2.4	Alteração dos dados climáticos .....	106
5.2.4.1	Clima tropical úmido .....	106
5.2.4.2	Clima semi-árido .....	106
5.3	Resultado da simulação de utilização de diferentes tipos de rejeito como material de construção de cobertura.....	109
6	CONCLUSÕES .....	111
6.1	Limitações.....	114
6.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	115
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

$a$	Parâmetro de ajuste da curva de retenção de umidade
$A$	Albedo: medida da reflexão das ondas curtas solares
$A_n$	Área de contribuição do ponto em questão
$a_v$	Coefficiente de compressibilidade [1/kPa]
$C_u$	Coefficiente de uniformidade
$C_\psi$	Coefficiente de correção
$C_w$	Coefficiente de consolidação
$D_{10}$	Diâmetro da partícula que corresponde a 10% passante na curva granulométrica
$D_{60}$	Diâmetro da partícula que corresponde a 60% passante na curva granulométrica
$D_v$	Coefficiente de difusão do vapor d'água através do solo [kg.m/kN.s]
$e$	Índice de vazios [adimensional]
$e_0$	Índice de vazios inicial [adimensional]
$e'$	Emissividade: capacidade de um objeto emitir ondas infra-vermelhas [ $\mu\text{m}$ ]
$e''$	Número de Euler, constante igual à 2,71828;
$e_a$	Pressão de vapor do ar acima da superfície da água [mm.Hg ou kPa]
$e_s$	Pressão de vapor na superfície da água [mm.Hg ou kPa]
$e_{sa}$	Pressão de vapor de saturação da temperatura média do ar [mm.Hg]
$E$	Evaporação [mm]
$E_0$	Evaporação potencial [mm/dia]
$f(u)$	Função de fluxo turbulento que depende das características do ar acima da superfície evaporativa [ $\text{mm}^3/\text{kN.dia}$ ]
$FPM$	Função que relaciona a capacidade da planta retirar água do solo com a sucção no solo
$G$	Densidade real dos grãos [adimensional]
$h_a$	Umidade relativa do ar
$h_r$	Umidade relativa na superfície do solo
$h_{co}$	Altura da franja capilar [cm]

$h_w$	Carga hidráulica da água [m]
$I_{ld}$	Radiação atmosférica de ondas longas recebidas
$I_S$	Radiação de ondas curtas recebidas
$K$	Condutividade hidráulica não saturada
$K_s$	Condutividade hidráulica saturada
$L'$	Drenagem lateral [mm]
$L_V$	Calor latente de vaporização [J/kg]
$M_V$	Coefficiente de variação volumétrica [1/kPa]
$m$	Parâmetro de ajuste da curva de retenção de umidade
$m'$	Parâmetro de ajuste associado à distribuição dos poros
$m_2^w$	Inclinação da curva ( $u_a - u_w$ ) <i>versus</i> volume de água quando ( $\sigma_y - u_a$ ) é zero
$m_1^w$	Inclinação da curva ( $\sigma_y - u_a$ ) <i>versus</i> volume de água quando ( $u_a - u_w$ ) é zero
$n$	Parâmetro de ajuste da curva de retenção de umidade
$Pp$	Precipitação [mm]
$P'$	Pressão total na fase de massa de ar [kPa]
$P_t$	Percolação [mm]
$P_V$	Pressão do vapor de água dentro do poro [kPa]
$Q$	Energia radiante disponível na superfície [mm/dia]
$q_l$	Fluxo vertical de água que atravessa uma unidade de área da secção transversal por unidade de tempo [m/s]
$q_v$	Fluxo de vapor d'água [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ]
$R'$	Escoamento superficial [mm]
$RT$	Espessura total da zona de raiz [m]
$S'$	Armazenamento de água no perfil [mm]
$S_c$	Grau de saturação devido às forças capilares
$S_a$	Adesão
$S_a^*$	Grau de saturação devido à adesão
$S_w$	Representa a remoção de água no solo pelas raízes de plantas
$S_m$	Sucção matricial [kPa]
$S_o$	Sucção osmótica [kPa]
$S_t$	Sucção total [kPa]
$T'$	Transpiração [mm]
$T$	Temperatura do solo [°K]
$Tr$	Transpiração real [mm]

$T_s$	Temperatura da superfície do solo [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$U_a$	Velocidade do vento [km/h]
$y$	Profundidade [m]

### Letras Gregas

$\theta$	Umidade volumétrica do solo
$\theta_i$	Teor de umidade volumétrico no ponto de inflexão
$\theta_s$	Teor de umidade volumétrico no ponto inicial
$\Gamma$	Inclinação da curva pressão de vapor de saturação <i>versus</i> temperatura na temperatura média do ar
$\Psi$	Sucção [kPa]
$\Psi_i$	Valor de sucção no ponto de inflexão [kPa]
$\Psi_n$	Parâmetro de sucção para garantir um componente adimensional [kPa]
$\Psi_p$	Intercepto da linha tangente no eixo da sucção matricial [kPa]
$\phi_a$	Potencial pneumático, respectivo à pressão na fase gasosa
$\phi_g$	Potencial gravitacional, obtido pela elevação do ponto em questão relativa ao nível de referência
$\phi_m$	Potencial mátrico, resultante de forças capilares ou de adsorção
$\phi_o$	Potencial osmótico ou de soluto, associado à pressão osmótica da água do solo
$\phi_p$	Potencial de adensamento, associado à sobrecarga aplicada no terreno, transmitida pela água intersticial
$\lambda$	Condutividade térmica [ $\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$ ]
$\nu$	Constante psicrométrica [ $0,0008 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$\tau$	Constante de Stefan-Boltzman [ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ]

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – (a) Perfil esquemático de uma barreira capilar (b) Curvas de retenção de umidade de solo fino e granular (c) Curvas de condutividade hidráulica de solo fino e granular. ....	13
FIGURA 2.2 – Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa. ....	16
FIGURA 2.3 – (a) Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa monolítica; (b) Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa com barreira capilar .....	17
FIGURA 2.4 – Sequência de atividades para o projeto de coberturas. ....	24
FIGURA 2.5 – Sistema de cobertura proposto por Ribeiro (2011). ....	31
FIGURA 2.6 – Ensaio de coluna. ....	32
FIGURA 3.1 – Elemento de solo não saturado com a fase gasosa contínua. ....	36
FIGURA 4.1 – Exemplo de malha de elemento finitos. ....	71

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1 – Curvas de retenção de umidade típicas para areias, siltes e argilas. ....	41
GRÁFICO 3.2 – Solução gráfica para determinação dos parâmetros de ajuste. ....	44
GRÁFICO 4.1 – Curvas granulométricas dos solos orgânico, argiloso, siltoso, arenoso e do rejeito. ....	61
GRÁFICO 4.2 – Curva de retenção de umidade do solo orgânico ajustada pelo método de Fredlund e Xing (1994). ....	62
GRÁFICO 4.3 – Curva de retenção de umidade do solo argiloso ajustada pelo método de Van Genuchten (1980). ....	63
GRÁFICO 4.4 – Curva de retenção de umidade do solo siltoso ajustada pelo método de Fredlund e Xing (1994). ....	63
GRÁFICO 4.5 – Curva típica de retenção de umidade do solo arenoso proposta por Fredlund e Xing (1994). ....	64
GRÁFICO 4.6 – Curva de retenção de umidade do rejeito ajustada pelo método de Fredlund e Xing (1994). ....	64
GRÁFICO 4.7 – Curvas de permeabilidade não saturada dos solos orgânico, argiloso, siltoso, arenoso e do rejeito obtidas pelo método de Fredlund <i>et al.</i> (1994). ....	65
GRÁFICO 4.8 – Temperatura do ar (Estação meteorológica AngloGold). ....	66
GRÁFICO 4.9 – Umidade relativa do ar (Estação meteorológica AngloGold). ....	67
GRÁFICO 4.10 – Velocidade do vento (Estação meteorológica AngloGold). ....	67
GRÁFICO 4.11 – Precipitação (Estação meteorológica AngloGold). ....	68
GRÁFICO 4.12 – Radiação solar (Estação meteorológica AngloGold). ....	68
GRÁFICO 4.13 – Variação do IAF ao longo do período da análise. ....	72
GRÁFICO 4.14 – Crescimento da raiz ao longo do período da análise. ....	73
GRÁFICO 4.15 – Comparação radiação solar medida em campo e calculada pelo programa. ....	76
GRÁFICO 4.16 – Função do teor de umidade volumétrico. ....	77
GRÁFICO 4.17 – Comparação da curva de retenção de umidade da argila para $M_v$ indicado pelo VADOSE/W e pelo valor obtido pelo ensaio. ....	78
GRÁFICO 4.18 – Comparação das curvas de retenção de umidade do solo orgânico obtidas pelos modelos Aubertin <i>et al.</i> (2003) e ajustada por Fredlund <i>et al.</i> (1994). ....	79
GRÁFICO 4.19 – Comparação das curvas de retenção de umidade do solo siltoso obtidas pelos modelos Aubertin <i>et al.</i> (2003) e ajustada por Fredlund <i>et al.</i> (1994). ....	79
GRÁFICO 4.20 – Comparação das curvas de retenção de umidade do solo argiloso obtidas pelos modelos Aubertin <i>et al.</i> (2003) e ajustada por Van Genuchten (1980). ....	80
GRÁFICO 4.21 – Comparação das curvas de retenção de umidade do rejeito obtidas pelos modelos Aubertin <i>et al.</i> (2003) e ajustada por Fredlund <i>et al.</i> (1994). ....	80
GRÁFICO 4.22 – Comparação das curvas de permeabilidade não saturada do solo orgânico obtidas pelos modelos de Fredlund <i>et al.</i> (1994) e Van Genuchten (1980). ....	81
GRÁFICO 4.23 – Comparação das curvas de permeabilidade não saturada do solo siltoso obtidas pelos modelos de Fredlund <i>et al.</i> (1994) e Van Genuchten (1980). ....	82
GRÁFICO 4.24 – Comparação das curvas de permeabilidade não saturada do solo argiloso obtidas pelos modelos de Fredlund <i>et al.</i> (1994) e Van Genuchten (1980). ....	82
GRÁFICO 4.25 – Comparação das curvas de permeabilidade não saturada do rejeito obtidas pelos modelos de Fredlund <i>et al.</i> (1994) e Van Genuchten (1980). ....	83
GRÁFICO 4.26 – Comparação do IAF estimado pelo usuário e pelo programa. ....	84

GRÁFICO 4.27 – Curvas granulométricas dos rejeitos proveniente do processamento de minério de ferro, bauxita, fosfato overflow, fosfato underflow e ouro. ....	91
GRÁFICO 4.28 – Curva de retenção de umidade do rejeito proveniente do processamento de minério de ferro a partir de sua granulometria, de acordo com o método proposto por Aubertin <i>et al.</i> (2003). ....	92
GRÁFICO 4.29 – Curva de retenção de umidade do rejeito proveniente do processamento de bauxita. ....	92
GRÁFICO 4.30 – Curva de retenção de umidade do rejeito proveniente do processamento de fosfato (overflow) a partir de sua granulometria, de acordo com o método proposto por Aubertin <i>et al.</i> (2003). ....	93
GRÁFICO 4.31 – Curva de retenção de umidade do rejeito proveniente do processamento de fosfato (underflow) a partir de sua granulometria, de acordo com o método proposto por Aubertin <i>et al.</i> (2003). ....	93
GRÁFICO 4.32 – Curvas de permeabilidade não saturada do rejeito proveniente do processamento de minério de ferro, bauxita, fosfato overflow, fosfato underflow e ouro obtida pelo método de Fredlund <i>et al.</i> (1994). ....	94
GRÁFICO 5.1 – Fluxo de água na base do sistema de cobertura selecionado. ....	97
GRÁFICO 5.2 – Balanço hídrico do sistema selecionado. ....	98
GRÁFICO 5.3 – Distribuição da precipitação que incide sobre a superfície do sistema selecionado. ....	99
GRÁFICO 5.4 – Perfil de saturação do sistema selecionado. ....	100

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Principais minerais sulfetados associados à DAM. ....	8
TABELA 2.2 – Principais causas de falhas em sistemas de cobertura.....	33
TABELA 3.1 – Técnicas para a medição da sucção em solos. ....	39
TABELA 3.2 – Programas mais utilizados em projetos de coberturas. ....	54
TABELA 4.1 – Parâmetros geotécnicos, origem dos materiais e fonte de obtenção dos resultados. ....	60
TABELA 4.2 – Geometrias analisadas.....	70
TABELA 4.3 – Variação dos parâmetros de entrada do modelo. ....	85
TABELA 4.4 – Dados climáticos de um município em clima tropical úmido.....	86
TABELA 4.5 – Dados climáticos de um município em clima semi-árido. ....	87
TABELA 4.6 – Parâmetros geotécnicos, origem dos rejeitos e fonte de obtenção dos resultados. ....	90
TABELA 5.1 – Resultado do estudo de caso. ....	96
TABELA 5.2 – Resultado da alteração do período da análise. ....	101
TABELA 5.3 – Resultado da alteração dos métodos de obtenções ou de tratamento dos parâmetros.....	101
TABELA 5.4 – Resultado da alteração da magnitude dos parâmetros. ....	105
TABELA 5.5 – Resultado da alteração para o clima tropical úmido. ....	107
TABELA 5.6 – Resultado da alteração para o clima semi-árido.....	108
TABELA 5.7 – Resultado das simulações da utilização dos rejeitos com granulometria siltosa como materiais de construção de camada de armazenamento e liberação. ....	109
TABELA 5.8 – Resultado da simulação da utilização do rejeito com granulometria arenosa como material de construção de barreira capilar.....	109

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DAM	Drenagem Ácida de Mina
GARD	Global Acid Rock Drainage Guide
IAF	Índice de Área Foliar
INAP	International Network for Acid Prevention
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ITRC	Interstate Technology & Regulatory Council
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NP	Não plástico
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

## RESUMO

Os resíduos de mineração compostos por minerais sulfetados, em presença de água e oxigênio, podem gerar uma solução aquosa ácida denominada drenagem ácida de mina. A técnica de prevenção deste problema mais utilizada é a cobertura dos resíduos com solo. Esta dissertação revisa os conceitos, fundamentos e equações relacionados ao dimensionamento de sistemas de cobertura com solo aplicado ao fechamento de barragens para disposição de resíduos de mineração, além de apresentar os tipos de sistemas de coberturas e as tecnologias atuais disponíveis para elaboração de projetos. Foi realizado um estudo de caso hipotético de fechamento de barragem de rejeito para descrever as principais etapas de projeto e exemplificar o dimensionamento de um sistema de cobertura com solo. Este estudo permitiu concluir que o dimensionamento de sistemas de cobertura com solo aplicado ao fechamento de barragens para disposição de resíduos de mineração é complexo, multidisciplinar e necessita de uma grande quantidade de dados de entrada que nem sempre são de fácil obtenção. A influência da variação dos parâmetros e das metodologias que são potenciais geradores de desvio do resultado final desejado foi quantificada e indicou que os resultados são muito sensíveis a muitos deles. Por fim, simulações da utilização de diferentes tipos de rejeitos brasileiros como material de construção de cobertura permitiram concluir que a utilização dos rejeitos como material de construção de cobertura pode ser considerada trazendo benefícios ambientais e econômicos.

**Palavras Chaves:** *drenagem ácida de mina, sistemas de cobertura com solo, fechamento de mina, resíduos de mineração.*

## ABSTRACT

The mine tailings consisting of sulfide minerals in the presence of water and oxygen can generate an acidic aqueous solution called acid mine drainage. The most commonly technique used to prevent this problem is to cover the tailings deposit with soil in a controlled manner. This thesis reviews the concepts, fundamentals and equations related to the design of soil cover systems applied to the closure of mining waste disposal sites. It also introduces the types of cover systems and current technologies available. A hypothetical study of a tailings dam closure case was conducted to describe the main design stages of a soil cover system. This study concluded that the design of soil cover systems applied to closure mining waste disposal facilities is complex, multidisciplinary and requires a large amount of input data that are not always easy to obtain. The influence of parameters variation and use of different methodologies to design soil covers was quantified and it was also indicated how these variations affect the results. Finally, numerical simulations were done considering different Brazilian's tailings as a cover material. It was found that the use of tailings as a building material of cover systems can be accepted, bringing environmental and economic advantages.

**Key words:** *acid mine drainage, cover systems with soil, mine closure, mining waste.*

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Importância e aplicabilidade do estudo

O crescente avanço tecnológico mundial vem cobrando um alto preço ambiental ao exigir uma exploração cada vez mais intensa de recursos minerais do planeta. Esta necessidade de matéria prima tem levado à utilização de jazidas que uma vez foram consideradas inviáveis economicamente para exploração, por apresentarem teores minerais baixos em relação a tantas outras antes disponíveis. A necessidade do uso destas jazidas promoveu acentuada elevação no custo de exploração e produção mineral e industrial. Mais ainda, levou a uma maior geração de resíduos e subprodutos decorrentes da transformação desta matéria prima (VILLAR, 2002).

Os principais resíduos da mineração são o estéril e o rejeito que representam a maior parte do material extraído. Como forma de disposição desta grande quantidade de rejeitos gerados, alvo deste trabalho, tem-se verificado uma preferência das mineradoras brasileiras pela deposição dos rejeitos em superfície, armazenados em reservatórios de barragens de rejeito, segundo constata Espósito (2000). Vale ressaltar que existem barramentos construídos como barragens convencionais, construídos com o próprio rejeito e ainda dispostos em rios e cavernas.

Quando nos resíduos de mineração existem determinados minerais sulfetados, em presença de água e oxigênio esses minerais são oxidados e podem dar origem à solução aquosa ácida denominada drenagem ácida de minas (DAM), o que lixivia os minerais sulfetados presentes no resíduo produzindo um lixiviado rico em metais dissolvidos e ácido sulfúrico. Caso o lixiviado alcance corpos hídricos próximos, pode contaminá-los, tornando-os impróprios para o uso por um longo tempo, mesmo depois de cessadas as atividades de mineração. Trata-se de um dos mais graves impactos ambientais associados à atividade de mineração (AMORIM, 2008).

No fechamento de áreas mineradas que apresentam problemas de produção de acidez, dois aspectos devem ser levados em conta: primeiro, o fato de que seus impactos não se restringem à área minerada, podendo atingir corpos hídricos superficiais e subterrâneos distantes do empreendimento e, segundo, que as reações químicas envolvidas no processo ocorrem por muitos anos, mesmo depois de esgotado o depósito mineral (UBALDO *et al.*, 2007).

Neste contexto, o descomissionamento de uma barragem de rejeito deve garantir que o fechamento da estrutura não comprometa a qualidade ambiental futura e limite a extensão de eventuais passivos de natureza ambiental, seja para o minerador, seja para a sociedade. A construção de sistemas de cobertura com solo é a técnica mais aplicada de prevenção de geração de

DAM e seu dimensionamento deve ser bem criterioso. O GARD/INAP (2012) afirma que as técnicas de prevenção de DAM devem consistir na aplicação de métodos que minimizem o fornecimento dos reagentes primários para a oxidação de sulfeto e/ou maximizem a quantidade e a disponibilidade de reagentes neutralizadores do ácido.

Deve-se mencionar que a cobertura não necessariamente se aplica só a casos em que é possível haver geração de drenagem ácida. Ela é necessária, de uma forma geral, para o descomissionamento do reservatório após o término da sua vida útil para controle de erosão, controle de poeira, sustentação da vegetação e, caso necessário, para permitir a trafegabilidade sobre o reservatório.

ITRC (2003) afirma que projeto de cobertura é uma ciência imprecisa e que combina princípios tradicionais de engenharia geotécnica, zona não saturada, fisiologia vegetal, ciência agrícola e a capacidade de fundir essas disciplinas em um projeto específico. Junqueira *et al.* (2011a) complementam que o projeto de um sistema de cobertura deve necessariamente considerar uma série de fatores para definir o tipo e a geometria final da cobertura. A quantidade de variáveis a ser considerada é extensa e se faz necessário utilizar metodologias que apresentem uma sequência lógica de atividades para que os dados de projeto sejam devidamente adquiridos. Neste contexto, esta dissertação pretende quantificar e discutir a influência de cada parâmetro, de cada metodologia e de cada etapa no dimensionamento e no desempenho de coberturas feitas de solo e de rejeito de mineração em curto e longo prazo via análise numérica.

Esforços têm sido feitos para se utilizar os próprios rejeitos de mineração como materiais para a construção de coberturas. Reis *et al.* (2011) verificam a possibilidade do uso de rejeitos e estéreis como barreiras impermeáveis e concluem que é possível a utilização de um rejeito fino como barreira impermeável. Wickland *et al.* (2006) descrevem estudos que comprovam que rejeitos de mineração e estéreis podem ser combinados para formar um material resistente a erosão e com propriedades hidráulicas compatíveis com as características necessárias para coberturas. Miskolczi e Wilson (2007) descrevem o uso de misturas de rejeitos e estéreis na construção de coberturas piloto e concluem que a mistura apresentou excelente desempenho durante o período monitorado. Fines e Wilson (2002), a partir de ensaios de laboratório, apresentam estudo que inclui a mistura de escória com o rejeito e o estéril e concluem que esta mistura pode proporcionar camada impermeabilizante de alta qualidade construtiva. Sobre a utilização de somente rejeito como uma das camadas de um sistema de cobertura não foi encontrada nenhuma referência. Este trabalho discute sobre o potencial dos rejeitos como material de construção de cobertura.

## 1.2 Objetivos desta pesquisa

O objetivo desta dissertação é discutir a influência de cada parâmetro, de cada metodologia e de cada etapa no dimensionamento e no desempenho de coberturas para reservatórios de disposição de resíduo de mineração construídas com solo e/ou rejeito de mineração a partir de análise numérica.

Os objetivos específicos são:

- Apresentar os tipos de sistemas de coberturas e as tecnologias atuais disponíveis para elaboração de projetos;
- Descrever as principais etapas de projeto de dimensionamento;
- Revisar conceitos, fundamentos e equações relacionados ao dimensionamento de sistemas de cobertura com solo aplicado ao fechamento de barragens para disposição de resíduos de mineração;
- Realizar simulação numérica utilizando o programa VADOSE/W, para verificação do comportamento e dimensionamento da cobertura;
- Obtenção e análise da curva de retenção de umidade a partir da curva granulométrica dos materiais utilizados na construção das coberturas;
- A partir de pontos de correlação entre sucção e teor de umidade volumétrico obtidos experimentalmente, obtenção e análise dos ajustes destes pontos pelos métodos de Fredlund e Xing (1994) e Van Genuchten (1981) para obtenção da curva de retenção de umidade;
- Obtenção e análise da curva de permeabilidade não saturada obtida pelos métodos de Fredlund *et al.* (1994) e Van Genuchten (1981);
- Discussão sobre o potencial de utilização de diferentes tipos de rejeitos brasileiros como material de construção de cobertura.

### 1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos:

- Capítulo 1: Introdução – apresenta a importância e aplicabilidade do estudo, os objetivos da pesquisa e como o trabalho se encontra organizado;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica – apresenta uma revisão dos principais aspectos e conceitos relacionados a sistemas de cobertura de reservatórios de resíduos de mineração;
- Capítulo 3: Fundamentos teóricos do problema – resume os principais métodos e equações associados à mecânica dos solos não saturados, ao fluxo da umidade no solo não saturado, ao fluxo do calor no solo, à evapotranspiração e às soluções numéricas existentes;
- Capítulo 4: Materiais e Métodos – apresenta a metodologia proposta para se alcançar os objetivos propostos que consiste em:
  - Estudo de caso – apresenta um estudo de caso hipotético de fechamento de barragem de rejeito para exemplificar o dimensionamento de um sistema de cobertura com solo e possibilitar discussões sobre os conceitos, as etapas e parâmetros envolvidos no problema;
  - Análises de sensibilidade no resultado – quantifica e analisa criticamente a sensibilidade no resultado final das definições tomadas durante o dimensionamento de um sistema de cobertura;
  - Utilização de rejeito como material de cobertura – discute sobre o potencial de utilização do rejeito como material de construção de sistemas de coberturas e verifica o potencial de utilização de diferentes tipos de rejeitos brasileiros como material de construção em sistemas de cobertura.
- Capítulo 5: Apresentação e discussão dos resultados – apresenta o resultado do estudo de caso, das análises de sensibilidade e da simulação da utilização de diferentes tipos de rejeito como material de construção de cobertura;
- Capítulo 6: Conclusões – apresenta as conclusões, limitações deste trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

Ao final são apresentadas as referências bibliográficas que subsidiaram esta dissertação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introdução

Sistemas de cobertura de solos têm sido utilizados para o recobrimento de rejeitos de mineração em projetos de fechamento de minas ao redor do mundo. Estes sistemas são projetados para minimizar a infiltração das águas das chuvas e/ou a difusão de oxigênio para o interior de rejeitos e pilhas de estéril, minimizando a lixiviação de metais e a geração de drenagem ácida associada com o processo de oxidação de minerais sulfetados (JUNQUEIRA *et al.*, 2011a). A geração da drenagem ácida de mina (DAM) e a lixiviação de metais resultam na contaminação das águas superficiais e subterrâneas, inviabilizando o uso dessas para fins recreativos e agrícolas. A DAM é um dos problemas ambientais mais significativos enfrentados pela indústria da mineração.

No fechamento de áreas mineradas que apresentam problemas de produção de acidez, dois aspectos devem ser levados em conta: primeiro, o fato de que seus impactos não se restringem à área minerada, podendo atingir corpos hídricos superficiais e subterrâneos distantes do empreendimento e, segundo, que as reações químicas envolvidas no processo ocorrem por muitos anos, mesmo depois de esgotado o depósito mineral (UBALDO *et al.*, 2007).

Segundo Amorim (2008), qualquer que seja a razão que leve ao descomissionamento de uma mina, os problemas da recuperação de áreas degradadas e reutilização do terreno devem ter posição de destaque. No âmbito da mineração, a recuperação de áreas degradadas é geralmente entendida como o conjunto de ações que visam tornar a área apta para outro uso, não necessariamente idêntica à que antecedeu a atividade de mineração. A possibilidade de um novo uso requer que a área apresente condições de estabilidade física, química e, em alguns casos, biológica, quando, por exemplo, a utilização futura da área será para fins de conservação ambiental e de ecossistemas.

A aplicação de sistemas de cobertura tem crescido rapidamente na última década e, embora não tenha sido usualmente proposta como uma solução que permita o abandono da barragem, o uso desta metodologia é muitas vezes atrativo. A construção de sistemas de cobertura é um dos poucos métodos disponíveis para minimizar o transporte de contaminantes a partir de rejeitos de mineração nos casos em que os processos de lixiviação de metais e drenagem ácida já se iniciaram.

Em muitos casos, o objetivo do projeto é estabelecer um sistema que funcionará por pelo menos 100 anos, porém a vida útil desejada se estende muito além da maioria dos critérios aceitos na prática da engenharia. Os empreendimentos minerários estão investindo nesta tecnologia relativamente nova, com a expectativa de que essas coberturas irão, em longo prazo, reduzir sua responsabilidade com relação aos custos da geração, condução e tratamento da DAM. Ressalta-se que, enquanto a vida útil de projetos de sistemas de cobertura para resíduos de mineração podem durar até centenas de anos, temos apenas algumas dezenas de anos de experiência em construção e de desempenho comprovado (WILSON *et al.*, 2003).

Os itens a seguir apresentam revisões bibliográficas dos temas abordados nesta dissertação. São elas: lixiviação, drenagem ácida de mina, tipos de coberturas de barragens, tipos de sistemas de coberturas, influência da vegetação em projetos de cobertura, metodologias para dimensionamento de coberturas e utilização de rejeitos como material de construção.

## **2.2 Lixiviação de metais e drenagem ácida de mina**

### **2.2.1 Lixiviação de metais**

Segundo a Norma Brasileira NRB 10.005 (ABNT, 2004b), lixiviação é o processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator. Sabe-se que, à medida que ocorre percolação de água pelo depósito de rejeito e/ou estéril, pode ocorrer solubilização seletiva de constituintes químicos do material como os metais pesados: ferro, cobre, zinco, cádmio, manganês e outros. Ao longo da trajetória deste fluxo, Fagundes (2005) ressalta que mais reações ocorrem até o ambiente receptor, influenciando ainda mais na qualidade da água drenada.

Além de ocasionar a contaminação, Reis *et al.* (2011) afirmam que os compostos lixiviados deixam espaços vazios na estrutura do material, que causam um aumento relativo de sua porosidade. Além da mudança estrutural, isso pode, por exemplo, aumentar a permeabilidade e diminuir a resistência do material. Os efeitos da lixiviação podem inviabilizar o uso de um determinado material, por exemplo, como camada impermeabilizante, pois deixará de ser funcional com o passar do tempo. Assim, verifica-se que a estabilidade física pode ser afetada por qualquer instabilidade química. Logo, os autores concluem que não é prudente o uso de um resíduo, sem que se avalie sua estabilidade química.

### 2.2.2 Drenagem ácida de mina (DAM)

A drenagem ácida de mina (DAM) é resultante da oxidação natural dos minerais sulfetados presentes nos rejeitos de mineração, na presença de água e oxigênio. Este fenômeno gera uma solução aquosa rica em ácido sulfúrico que age como agente lixiviante dos minerais presentes no resíduo produzindo um lixiviado rico em metais dissolvidos.

Sengupta (1993) apresenta os componentes básicos que geralmente afetam a capacidade de geração de ácido e os componentes que afetam a taxa de geração:

Componentes que afetam a capacidade total de geração de ácido:

- Quantidade de minerais sulfetados presentes;
- Quantidade de minerais neutralizadores presentes;
- Quantidade e tipo de contaminantes potenciais presentes.

Componentes que afetam a taxa de geração de ácido:

- Tipo do mineral sulfetado presente;
- Tipo do mineral carbonatado presente;
- Área de contato da superfície mineral sujeita ao intemperismo e oxidação;
- Ocorrência dos grãos minerais do depósito;
- Tamanho das partículas do depósito;
- Disponibilidade de água e oxigênio;
- Tipo e quantidade de bactérias.

Ressalta-se o Guia Global de Prevenção de Drenagem Ácida (GARD/INAP, 2012) como a principal referência mundial sobre o assunto.

### 2.2.3 Principais minerais geradores de DAM

Os minerais sulfetados que contêm enxofre geram uma fonte potencial de geração de DAM. Alguns dos mais importantes minerais sulfetados envolvidos no processo de formação da DAM estão listados na TAB. 2.1.

TABELA 2.1 – Principais minerais sulfetados associados à DAM.

<b>Mineral</b>	<b>Composição química</b>
Arsenopirita	$\text{FeS}_2 \cdot \text{FeAs}$
Bornita	$\text{CuFeS}_4$
Calconita	$\text{Cu}_2\text{S}$
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$
Covelita	$\text{CuS}$
Galena	$\text{PbS}$
Esfalerita	$\text{ZnS}$
Milerita	$\text{NiS}$
Molibidenita	$\text{MoS}_2$
Pirita	$\text{FeS}_2$
Marcassita	$\text{FeS}_2$
Pirrotita	$\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$

FONTE - FAGUNDES, 2005.

Segundo o GARD/INAP (2012), a pirita é o mineral mais importante associado à geração de DAM e está relacionada com muitos metais de valor econômico, como o zinco, urânio, ouro, prata e outros.

#### 2.2.4 Métodos de investigação

Para avaliar o potencial de geração ácida de um material, os testes analíticos, geralmente classificados como estáticos ou cinéticos, representam as metodologias mais utilizadas.

Segundo Fagundes (2005) o ensaio estático MABA, apresentado por Lawrence e Wang (1997), é mais rapidamente conduzido e mais barato e determina tanto o potencial de geração, quanto o de neutralização da amostra. A diferença entre estes dois valores resulta na capacidade de geração ácida da amostra e traduz somente o potencial de produção de ácido, porém não prevê a taxa real de geração. O ensaio indica também se a amostra tem o balanço estequiométrico que favorece a acidez ou alcalinidade.

Já os ensaios cinéticos tentam simular as condições reais de campo. Geralmente necessitam de maior tempo de execução e por isso se tornam mais caros.

No Brasil, os procedimentos para obtenção de extrato lixiviado e solubilizado de resíduos sólidos é apresentado respectivamente pela NBR 10.005 (ABNT, 2004b) e NBR 10.006

(ABNT, 2004c). Os resultados são comparados com os limites apresentados pela Norma Brasileira NRB 10.004 (ABNT, 2004a).

Fagundes (2005) afirma que, idealmente, as informações obtidas de ensaios estáticos e cinéticos devem ser coletadas e avaliadas para fornecer um completo subsídio técnico.

#### 2.2.5 Técnicas tratamento

Idealmente, as técnicas de prevenção à drenagem ácida devem ser concebidas e definidas previamente ao início das operações de exploração da mina. Entretanto, devido ao desconhecimento geral em décadas passadas com relação à DAM, várias minas iniciaram suas atividades sem utilizar qualquer tecnologia de prevenção (FAGUNDES, 2005).

O GARD/INAP (2012) apresenta os métodos existentes para tratamento da DAM. Das técnicas de tratamento abordadas no guia, duas das mais utilizadas para rejeitos que apresentam minerais sulfetados são descritas a seguir.

#### Dessulfurização do rejeito

A dessulfurização do rejeito consiste na separação e remoção do sulfeto pelo processo de flotação. Dobchuk *et al.* (2003) apresentam caso bem sucedido na mina de ouro de Detour Lake, no estado de Ontário no Canadá onde se confirma a eficiência da utilização de rejeito dessulfurizado disposto sobre rejeitos em condições naturais. Em geral, a viabilidade dessa opção de separação sulfeto depende das características dos rejeitos e, portanto, cada caso deve ser avaliado.

#### Passivação com a adição de permanganato de potássio

A passivação é o processo de adição de permanganato de potássio ao rejeito para neutralizar o sulfeto. Este permanganato adicionado limita a liberação de contaminantes através da criação de uma camada superficial quimicamente inerte e protetora.

## 2.2.6 Técnicas de prevenção

O GARD/INAP (2012) afirma que as técnicas de prevenção de DAM devem consistir na aplicação de métodos que minimizem o fornecimento dos reagentes primários para a oxidação de sulfeto e/ou maximizem a quantidade e a disponibilidade de reagentes neutralizadores do ácido. Portanto as soluções devem:

- Minimizar o fornecimento de oxigênio;
- Minimizar a infiltração de água e a lixiviação (a água atua tanto como reagente como mecanismo de transporte);
- Minimizar, remover ou isolar os minerais sulfetados;
- Controlar o pH da água intersticial;
- Maximizar a disponibilidade de minerais neutralizadores de ácido e da alcalinidade da água intersticial;
- Controlar a presença de bactérias e de processos biogeoquímicos.

Este trabalho aborda a utilização de sistemas de cobertura com solo aplicado ao fechamento de barragens de disposição de resíduos de mineração por ser a técnica de prevenção de geração de DAM mais utilizada.

## **2.3 Cobertura com solo para depósitos de resíduos de mineração**

A construção de uma cobertura de um depósito de resíduos de mineração pode ser feita utilizando-se uma vasta gama de materiais naturais ou sintéticos, utilizados isoladamente ou combinados para evitar que a água e o oxigênio entrem em contato com o rejeito coberto. Neste trabalho será abordada apenas a utilização de solo como material de construção, porém o GARD/INAP (2012) apresenta os todos os tipos de cobertura mais utilizados.

### 2.3.1 Tipos de coberturas com solo

Este item apresenta os tipos de cobertura com solo mais utilizados atualmente.

### 2.3.1.1 Camada superficial

A camada orgânica superficial (ou *top soil*) é responsável pelo controle de erosão das camadas inferiores, pelo controle de poeira, pela sustentação da vegetação e, caso necessário, por permitir a trafegabilidade sobre o reservatório.

O crescimento de cobertura vegetal, além da transpiração, fornece ao sistema uma proteção contra a erosão, na medida em que reduz os impactos da chuva e diminui a velocidade dos ventos na superfície da cobertura. No entanto, em regiões áridas, é muito difícil estabelecer e manter uma vegetação consistente na superfície do sistema de cobertura. Em tais condições, tem sido utilizada uma camada de cascalho para substituir a camada de cobertura vegetal. Dependendo da granulometria e das declividades da superfície dos rejeitos, o cascalho pode ser altamente resistente à erosão provocada pelo vento e/ou pela chuva (AMORIM, 2008).

Barragens que apresentam rejeitos inertes, isto é, sem potencial de geração de DAM ou de lixiviação de metais, naturalmente não necessitam de cobertura para evitar estes problemas. Porém, uma camada superficial sobre o rejeito deve ser avaliada para permitir a trafegabilidade, sustentação da vegetação e/ou controle de erosão e poeira.

### 2.3.1.2 Cobertura de armazenamento e liberação de água

A camada armazenamento e liberação deverá ser capaz de acumular a água de infiltração durante o período chuvoso e liberá-la de volta para a atmosfera por evapotranspiração durante os períodos de estiagem. Ela deve ser suficientemente espessa para que o acréscimo de umidade durante o período de armazenamento não alcance a sua base, uma vez que, se isso acontecer, a água poderá chegar aos resíduos. Esta capacidade de armazenamento é função do tipo de solo, da espessura da camada e das condições meteorológicas locais.

Junqueira *et al.* (2011a) complementam que esta cobertura consiste de uma camada de solo bem graduado sobreposta por uma camada de solo orgânico próprio para o desenvolvimento de vegetação. A água que infiltra na cobertura durante o período chuvoso é temporariamente armazenada dentro da camada de solo bem graduado. Posteriormente, durante o período seco, a água armazenada é removida da cobertura pelos processos de evaporação e evapotranspiração das plantas. Esse tipo de cobertura depende fortemente da presença sustentável de vegetação e é apropriada a regiões de clima seco ou em que a taxa anual de evaporação excede a taxa de precipitação.

### 2.3.1.3 Cobertura de barreira capilar

A barreira capilar consiste de uma camada de material granular, sobreposta por uma camada de material fino. Como a capacidade drenante do material granular é muito maior do que a do material fino da cobertura, o material granular da base torna-se não saturado muito mais rapidamente que a camada de material fino acima dele. Em condições não saturadas e elevados valores de sucção, a condutividade hidráulica do material granular torna-se muito baixa com valores menores do que a do material fino no topo da cobertura, formando uma barreira capilar de baixíssima condutividade hidráulica que impede a infiltração de água.

A FIG. 2.1 apresenta (a) o perfil esquemático de uma barreira capilar, (b) as curvas de retenção de umidade do solo fino e granular, além (c) das curvas de condutividade hidráulica destes mesmos solos. Por meio da precipitação, a umidade do solo fino localizado na parte superior é incrementada até atingir umidade volumétrica final ( $\theta_f$ ) o que corresponde na FIG. 2.1b, a sucção matricial ( $\Psi_b$ ). Neste momento, haverá continuidade hidráulica uma vez que a sucção na interface entre as duas camadas é igual a  $\Psi_b$  e a água começa a infiltrar lentamente no solo granular.

Observando a FIG. 2.2c, nota-se que para a condição de sucção  $\Psi_b$  tem-se que o coeficiente de permeabilidade do solo granular ( $K_g$ ) é menor do que a do solo fino ( $K_f$ ) e, por esta razão, o fluxo de água para o interior do solo granular é lento. Nesta condição, o solo fino atua como um reservatório que armazena a água infiltrada que será retirada posteriormente pela evapotranspiração e/ou drenagem lateral.

Em caso de chuvas intensas e prolongadas e/ou quando o sistema de barreira não estiver devidamente dimensionado, a umidade dos solos poderá aumentar demais, reduzindo a sucção na interface das camadas para sucções inferiores a  $\Psi_b$ . Nesta condição, a condutividade hidráulica do solo granular será maior que a do solo fino (FIG. 2.1c) e a barreira capilar não mais restringirá a passagem de água, situação habitualmente chamada de "quebra de barreira capilar" (AMORIM, 2008).

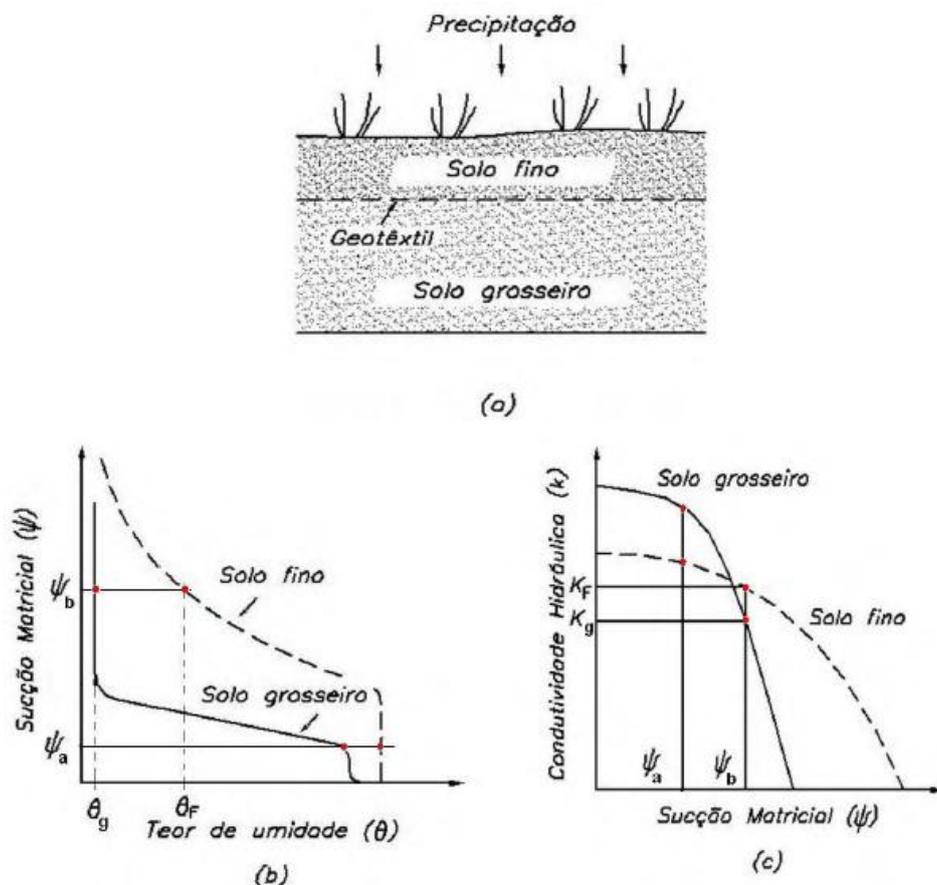


FIGURA 2.1 – (a) Perfil esquemático de uma barreira capilar (b) Curvas de retenção de umidade de solo fino e granular (c) Curvas de condutividade hidráulica de solo fino e granular.  
 FONTE - Adaptado de ABICHOU *et al.*, 2004.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), barreira capilar é um fenômeno que propicia uma redução drástica no fluxo de água a partir da camada superior. Esse tipo de cobertura requer uma avaliação cuidadosa das características do solo granular da base e fino do topo, uma vez que o desenvolvimento do efeito de barreira capilar depende diretamente das diferenças granulométricas e hidráulicas dos dois tipos de materiais.

#### 2.3.1.4 Camada de barreira hidráulica

Esta camada consiste da construção de uma camada compactada de solo argiloso de baixa permeabilidade sobre o material a ser coberto. Esse tipo de cobertura requer medidas de controle de erosão e é bastante susceptível a degradação de desempenho associado com o surgimento de rachaduras no solo (BENSON *et al.*, 2007; TIMMS E BENNET, 2002).

Ribeiro (2011) complementa que a camada de barreira hidráulica tem como função minimizar a percolação da água através do sistema e indiretamente promover a drenagem ou

armazenagem da água em camadas superiores, aumentando a evapotranspiração e o escoamento superficial. A barreira hidráulica, se trabalhar saturada ou próxima da saturação, minimiza, também, a percolação de gases. Entretanto, camadas de argilas compactadas podem apresentar trincas ou fissuras causadas por ressecamento ou por recalques diferenciais que, naturalmente, aumentariam a condutividade hidráulica da camada barreira.

### 2.3.2 Tipos de sistemas de coberturas feitos com solo

As camadas apresentadas anteriormente podem ser combinadas de forma a gerar sistemas de cobertura que atendam aos desempenhos necessários para as condições específicas de cada projeto. Amorim (2008) e Ribeiro (2011) apresentam dois sistemas de cobertura com solo: os convencionais (ou prescritivos) e os evapotranspirativos (ou alternativos).

#### 2.3.2.1 Sistemas de coberturas convencionais

Os sistemas de coberturas convencionais utilizam camadas com baixa condutividade hidráulica para minimizar a infiltração de água e, com isso, maximizam o escoamento superficial e a evaporação. Os componentes básicos destes sistemas de coberturas, a partir do topo, são descritos a seguir:

- Uma camada superficial, normalmente feita com solo orgânico, para controle de erosão e sustentação da vegetação;
- Eventualmente, uma camada de drenagem de líquidos pode ser inserida entre a primeira camada e a barreira hidráulica apresentada em seguida. As principais funções desta camada são reduzir a carga hidráulica sobre a barreira hidráulica minimizando assim a infiltração e drenar a água que infiltra pela camada superficial permitindo a esta captar maior volume de água e, conseqüentemente, diminuir o escoamento superficial;
- Uma camada de material de baixa condutividade hidráulica (ou barreira hidráulica);
- Se necessário, uma camada de fundação;
- Se os resíduos produzem gases e/ou apresentarem fluxo ascendente de água proveniente do rejeito, uma camada para drenagem de líquidos e gases pode ser

adicionada abaixo da barreira hidráulica. Vale ressaltar que a camada de fundação que também pode servir como camada de drenagem.

A experiência tem mostrado que este tipo de cobertura pode apresentar vulnerabilidades e limitações, tais como: mau funcionamento causado pelo ressecamento e, conseqüente, fissuramento da camada barreira; grandes investimentos para a sua construção e manutenção; durabilidade, seu desempenho pode piorar com o tempo devido à degradação pela erosão superficial, etc (EPA, 1999 *apud* Amorim, 2008).

Qian *et al.* (2002) afirmam que os materiais utilizados nas camadas de drenagem devem ser solos sem coesão como, por exemplo, as areias e cascalhos e/ou os geossintéticos. Se a camada de drenagem é feita de solo, recomendam-se espessura e declividade mínimas de, respectivamente, 30 cm e 4% e coeficiente de permeabilidade maior que  $1 \times 10^{-2}$  cm/s. Além disso, é necessário que o material drenante se enquadre também como filtro, ou seja, que ao mesmo tempo seja drenante e não permita a migração das partículas de solos adjacentes para os seus vazios.

#### 2.3.2.2 Sistemas de coberturas evapotranspirativas

Conforme apresentado por Amorim (2008), este tipo de sistema de cobertura consiste na disposição das seguintes camadas:

- Uma camada superficial para controle de erosão e plantio de vegetação, que garantirá a evapotranspiração principalmente durante a estação de crescimento das plantas;
- Uma camada de solo pouco compactado, normalmente chamada de camada de armazenamento e liberação;
- Se for o caso, uma camada de solo com granulometria mais grosseira constituindo a barreira capilar;
- Por fim, abaixo desta camada, se necessário, uma camada de fundação.

As principais características de uma cobertura evapotranspirativa são:

- Funcionam como estruturas naturais;
- Possuem maior vida útil;
- Demandam manutenção mais fácil;
- Demandam menor custo de implantação.

Segundo Abichou *et al.* (2004), na cobertura evapotranspirativa a vegetação tem papel fundamental, uma vez que as raízes são as principais responsáveis por retirar parte da água armazenada nos solos destas coberturas. O princípio de funcionamento de coberturas evapotranspirativas é mostrado na FIG. 2.2.

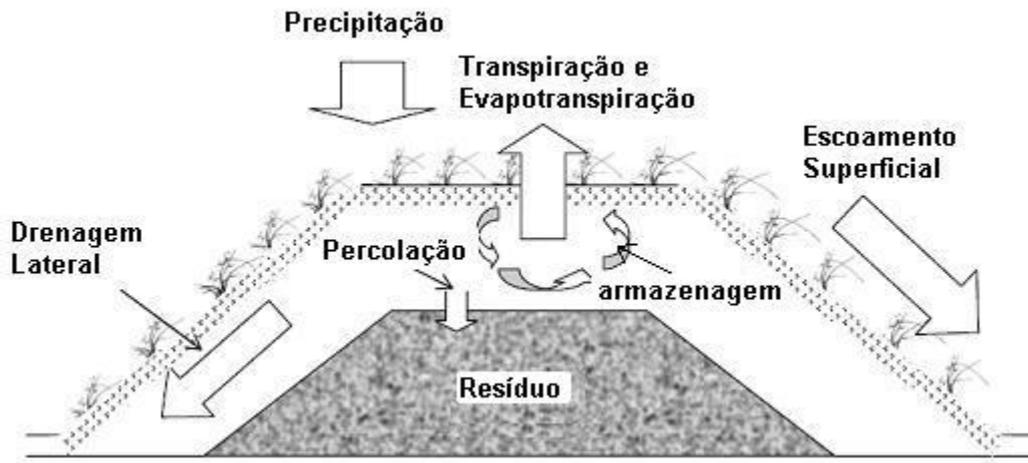


FIGURA 2.2 – Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa.  
 FONTE - Adaptado de ABICHOU *et al.*, 2004.

O balanço hídrico da cobertura pode ser representado pela EQ. 2.1 (Abichou *et al.*, 2004):

$$P_t = P' - R' - S' - T' - E - L' \quad (2.1)$$

Em que:

- $P_t$  = percolação (mm);
- $P'$  = precipitação (mm);
- $R'$  = escoamento superficial (mm);
- $S'$  = armazenamento de água no perfil (mm);
- $T'$  = transpiração (mm);
- $E$  = evaporação (mm);
- $L'$  = drenagem lateral (mm).

As variáveis precipitação e evaporação da EQ. 2.1 podem ser quantificadas, porém não podem ser alteradas visto que são inerentes às condições climáticas locais. As demais variáveis

podem ser otimizadas para redução da percolação, aumentando o escoamento superficial, o armazenamento de água, a evapotranspiração e a drenagem lateral.

O armazenamento de água pode ser incrementado com a seleção de solos apropriados, com o aumento da espessura da camada e/ou a colocação de uma barreira capilar. A maximização da transpiração pode ser alcançada selecionando a vegetação adequada, a sua extensão e densidade. A drenagem lateral poderá ser incrementada adicionando uma camada que também funcione como barreira capilar (AMORIM, 2008; RIBEIRO, 2011).

Existem dois tipos básicos de coberturas evapotranspirativas: coberturas monolíticas e coberturas com barreiras capilares (ABICHOU *et al.*, 2004). A FIG. 2.3 apresenta os perfis típicos.

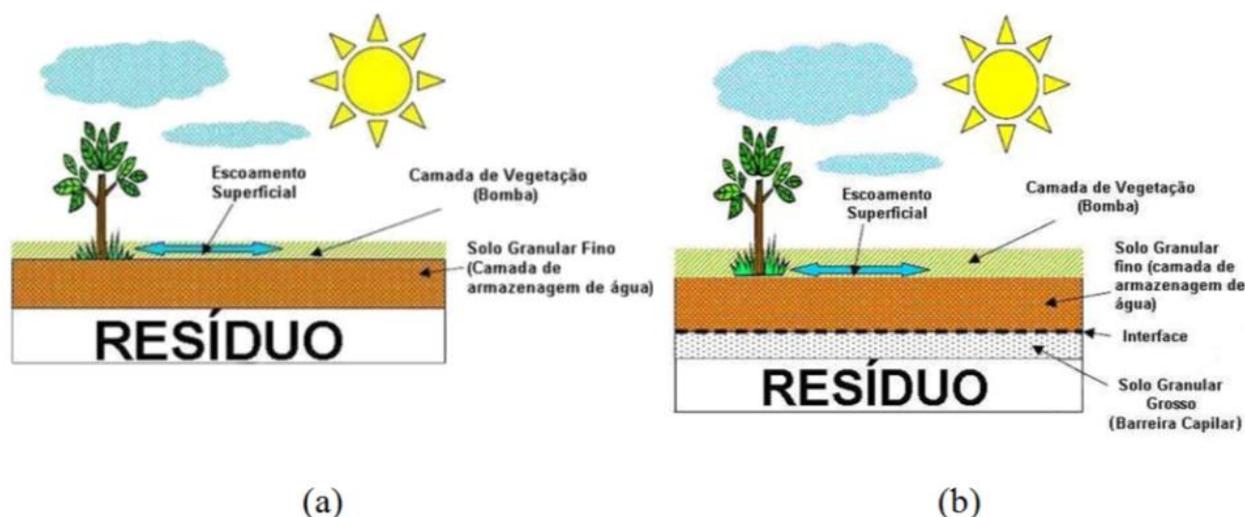


FIGURA 2.3 – (a) Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa monolítica; (b) Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa com barreira capilar  
FONTE - Adaptado de ABICHOU *et al.*, 2004.

As coberturas evapotranspirativas monolíticas são formadas por uma camada de solo para plantio de espécies vegetais, maximizando a transpiração; uma camada de armazenamento e liberação; e, se necessário, uma camada de solo de fundação. Como as camadas de armazenamento e liberação são normalmente construídas com areias siltosas, siltes, e siltes argilosos, as coberturas evapotranspirativas monolíticas só podem ser economicamente viáveis quando uma grande quantidade destes solos está disponível no local em que se construirá o sistema de cobertura (BENSON E KHIRE, 1995).

As coberturas evapotranspirativas com barreiras capilares se diferem das monolíticas por apresentarem uma camada de solo granular abaixo da camada de armazenamento e liberação para funcionar como barreira capilar.

Enquanto o desempenho das coberturas convencionais decresce com o tempo em consequência do ressecamento e erosão, o desempenho das coberturas alternativas tende a melhorar com o tempo, porque as raízes tendem a se desenvolver horizontal e verticalmente, estabilizando a vegetação, aumentando a transpiração e a proteção contra a erosão. A expectativa de vida de uma cobertura evapotranspirativa é de milhares de anos, porque elas estão mais próximas do que ocorre normalmente na natureza. Para o caso das coberturas convencionais, a vida útil é incerta (LANGONI, 2002).

### 2.3.3 Influência do clima local na escolha do sistema de cobertura

O GARD/INAP (2012) afirma que um o primeiro fator que determina o tipo de cobertura a ser projetada é o clima local. De modo geral, coberturas de armazenamento e liberação de água e barreira capilar são mais eficientes em climas áridos e semi-áridos, em que a taxa de evaporação excede a precipitação. Nyhan *et al.* (1990) afirmam que, além de mais efetivas, as barreiras capilares são mais facilmente construídas e custam menos que as coberturas convencionais. Porém, Morris e Stormont (1997) afirmam que barreiras capilares não são eficientes em condições climáticas de moderada a elevadas precipitações, sendo, portanto, indicadas somente para ambientes áridos e semi-áridos.

Coberturas combinadas com diferentes geometrias são tipicamente utilizadas em climas com estações seca e chuvosa bem definidas, em que as taxas de precipitação e evaporação são relativamente similares, mas com predominância de uma ou de outra durante um determinado período do ano. Coberturas de baixa permeabilidade (solos compactados) podem ser utilizadas em regiões de clima úmido, mas devem ser combinadas com outros componentes para evitar problemas de erosão e surgimento de rachaduras na camada compactada (ALBRIGHT *et al.*, 2010).

## 2.4 **Vegetação em projetos de cobertura**

Acima da cobertura, pode-se adicionar uma camada de solo com características que facilitem a germinação e o estabelecimento da cobertura vegetal. Esta vegetação, segundo EPA (2002) citada por AMORIM (2008), possui funções importantes em projetos de cobertura:

- As folhas interceptam parte das chuvas antes do impacto com o solo, reduzindo a energia da água e, conseqüentemente, o potencial de erosão;
- A vegetação também ajuda a dissipar a energia dos ventos;

- O sistema radicular raso das plantas aumenta a resistência da camada superficial contra os agentes erosivos (água e ventos);
- A vegetação promove a transpiração da água, incrementando a capacidade de armazenamento dos solos da cobertura, minimizando a drenagem lateral e a infiltração por estes solos;
- Uma superfície bem vegetada é geralmente considerada mais natural e mais agradável esteticamente que uma superfície sem vegetação.

#### 2.4.1 Seleção da vegetação apropriada

As espécies das plantas podem variar dependendo do clima, uso do solo em longo prazo, tipo do rejeito, limitações do projeto, etc. Pode ser interessante o plantio somente de espécies nativas ou utilizar uma mistura de espécies que poderá maximizar o número de dias de transpiração bem como a quantidade total de água a ser retirada. Mistura de espécies nativas e não nativas geralmente apresentam bons resultados quando se pensa em redução ou eliminação da quantidade de água na cobertura. Deve-se ter em mente os objetivos do pós-fechamento da área, quando é desejável que a vegetação exija a menor manutenção possível e tenha sustentabilidade em longo prazo (ITRC, 2003).

Segundo EPA (2002) citada por Amorim (2008), para a seleção da vegetação apropriada para um determinado local, as seguintes recomendações devem ser seguidas:

- Plantas nativas com baixo crescimento (menor que 1 m de altura) e gramíneas são recomendadas para manter a estabilidade ecológica em longo prazo;
- As plantas selecionadas devem sobreviver às condições climáticas locais;
- As plantas devem possuir raízes profundas o suficiente para remover a umidade da camada superficial, mas, não tão profunda que possa afetar as demais camadas da cobertura;
- As plantas devem ser capazes de crescer com a mínima quantidade adicional de nutrientes e com pouca, ou nenhuma, manutenção;
- A comunidade vegetal deve ser suficientemente diversa para promover a proteção contra a erosão e a transpiração durante todas as estações do ano e sob uma variedade de condições adversas;
- As plantas não devem atrair espécies animais escavadoras.

#### 2.4.2 Consumo de água pelas plantas

O consumo de água por culturas agrícolas normalmente se refere a toda água perdida pelas plantas e da superfície dos solos mais a água retida nos tecidos vegetais. A porcentagem de água nos tecidos vegetais é alta, mas mesmo assim é, em geral, menor que 1% do total evaporado durante o ciclo de crescimento da planta. Portanto, o consumo de água das plantas normalmente se refere apenas à água perdida pela transpiração das plantas e pela evaporação da superfície do solo (REICHARDT E TIMM, 2004).

As seguintes definições são importantes:

- Transpiração: perda de água na forma de vapor, através da superfície da planta;
- Evaporação potencial: perda de água controlada pelas condições da atmosfera, ou seja, quando a água disponível na superfície é ilimitada, como no caso dos oceanos e reservatórios;
- Evaporação real ou evaporação: perda de água na forma de vapor, através da superfície do solo controlada pelas condições/disponibilidade de água da superfície, por exemplo, limitada pelo conteúdo de umidade do solo ou pelo comportamento fisiológico da vegetação. Eventualmente a evaporação real é equivalente à evaporação potencial;
- Evapotranspiração: é a soma da transpiração com a evaporação.

Mudanças no potencial de transpiração ocorrem durante o ano associadas com a precipitação, vento, pressão atmosférica e variação da temperatura. Na estação de crescimento vegetativo, diferentes espécies iniciam e alcançam o pico de crescimento em tempos variados. As plantas podem responder de forma alternada dependendo de condições climáticas, favoráveis ou não, na mesma estação de crescimento.

Para aplicações práticas em sistemas de cobertura, é importante escolher comunidades de espécies que possam responder bem a todas as condições durante a estação de crescimento e, assim, maximizar a transpiração. Assim, é interessante incluir uma mistura de espécies que estarão ativas durante as estações quentes e frias de forma que a transpiração na cobertura possa estar presente em qualquer período do ano (REICHARDT E TIMM, 2004).

### 2.4.3 Profundidade das raízes

Dados locais sobre a estrutura, a densidade e a profundidade das raízes podem ser difíceis de serem obtidos. A profundidade real das raízes é usualmente controlada pelas propriedades do solo e não somente pelo potencial da planta. Assim, pode ser interessante a utilização de modelos que consideram o crescimento das raízes limitado pelas propriedades do solo. Em geral, as gramíneas têm a maioria das suas raízes juntas formando uma densa rede de raízes fibrosas a meio metro da superfície do solo (EPA, 2002 *apud* AMORIM, 2008).

### 2.4.4 Índice de área foliar

A área foliar é a soma das áreas de cada folha e, segundo Reichardt e Timm (2004), o índice de área foliar (IAF) é a relação entre a área das folhas e a área do solo ocupada pelas plantas. EPA (2002), citado por Amorim (2008), afirma que o IAF é o maior controlador da transpiração. A área foliar é muito importante na absorção da radiação e na realização da fotossíntese durante o período diurno e em ciclos sazonais. Por exemplo, durante o período de crescimento vegetativo, o IAF pode começar nulo, atingir um valor máximo e cair eventualmente até zero. Essa variação é importante em muitos modelos, uma vez que controla a transpiração das plantas. Com o crescimento da área foliar, as plantas aumentam o uso da água.

Os métodos de medição e estimativa do IAF são geralmente classificados na literatura como diretos e indiretos. Ribeiro (2011) descreve os métodos diretos de medição do IAF citados abaixo:

- Método de delineamento da folha;
- Método com base na combinação de formas e tamanhos-padrões;
- Método de cálculo com base em medidas lineares;
- Método com base na relação entre área e massa foliar;
- Método da planimetria óptica.

Os métodos de medição indireta do IAF são, usualmente, baseados na medição da atenuação de radiação pelo dossel (cobertura vegetal), a partir da teoria de transferência de radiação. Em geral, os métodos de medida direta apresentam maior precisão, mas são mais trabalhosos que os indiretos (RIBEIRO, 2011).

#### 2.4.5 Ponto de murcha

O ponto de murcha do solo é o teor de umidade volumétrico abaixo do qual as plantas não conseguem mais extrair água do solo. A rigor, o ponto de murcha não é um valor único dentro de uma massa de solo, porque, mesmo quando o solo se encontra com umidade maior que a correspondente ao ponto de murcha, nem toda água contida nos poros está disponível para as plantas, uma vez que as forças atrativas entre as moléculas de água e as partículas de argila do solo em microporos podem ser muito maiores que a capacidade de extração das plantas (EPA, 2002 *apud* AMORIM, 2008).

O manual do programa VADOSE/W (GEO-STUDIO, 2008) sugere 100 kPa como a sucção correspondente à umidade volumétrica em que a planta começa a ter dificuldade em extrair água do solo e 1500 kPa como a máxima capacidade de extração de água do solo pelas plantas. No entanto, o ponto de murcha varia de acordo com as características do solo e das plantas. Solos com elevados teores de argilo-minerais podem ter um valor de ponto de murcha maior que o dos solos granulares. Algumas espécies de plantas são melhores adaptadas para remover a umidade do solo e, portanto, elas têm um ponto de murcha menor.

Em camadas de solos rasos, a redução da água continua além do ponto de murcha devido à evaporação. As camadas de solos profundos não são afetadas pela evaporação direta, e permanecem com o valor do ponto de murcha original.

### **2.5 Metodologias para dimensionamento de coberturas**

ITRC (2003) afirma que projeto de cobertura é uma ciência imprecisa e que combina princípios tradicionais de engenharia geotécnica, zona não saturada, fisiologia vegetal, ciência agrícola e a capacidade de fundir essas disciplinas em um projeto específico. Junqueira *et al.* (2011a) complementam que o projeto de um sistema de cobertura deve necessariamente considerar uma série de fatores para definir o tipo e a geometria final da cobertura. A quantidade de variáveis a ser considerada é extensa e se faz necessário utilizar metodologias que apresentem uma sequência lógica de atividades para que os dados de projeto sejam devidamente adquiridos. É importante ainda que a configuração da cobertura projetada seja testada antes da construção final. Esta sequência de atividades de projetos de cobertura deve envolver a realização de ensaios geotécnicos específicos, utilização de modelos computacionais para simulações numéricas, construção de células teste, instrumentação e monitoramento de desempenho.

Junqueira *et al.* (2011a) citam os principais fatores que definem a configuração final da cobertura:

- Condições climáticas;
- Tipos de materiais disponíveis para a construção;
- Objetivos da cobertura, tipo de rejeito a ser coberto;
- Exigências de desempenho;
- Custos de construção.

Projetos de cobertura dependem da combinação de camadas de solo, de espécies de plantas e de condições atmosféricas de forma sustentável e tendem a manter o balanço hídrico desejado. A concepção deve focar na avaliação de cada componente individualmente e na sua interação com os outros componentes.

Neste item serão apresentadas três metodologias para dimensionamento de coberturas propostas por Junqueira *et al.* (2011a), ITRC (2003) e Ribeiro (2011). Ressalta-se que o sucesso da cobertura depende da realização cuidadosa de cada etapa do projeto. As metodologias apresentadas devem ser devidamente refinadas para acomodar as condições específicas de cada projeto.

#### 2.5.1 Metodologia proposta por Junqueira *et al.* (2011a)

Junqueira *et al.* (2011a), baseado em padrões e práticas internacionais, indicaram uma sequência geral de atividades que pode ser definida para o projeto de sistemas de cobertura. Estas atividades são interligadas e se encontram ilustradas na FIG. 2.4.

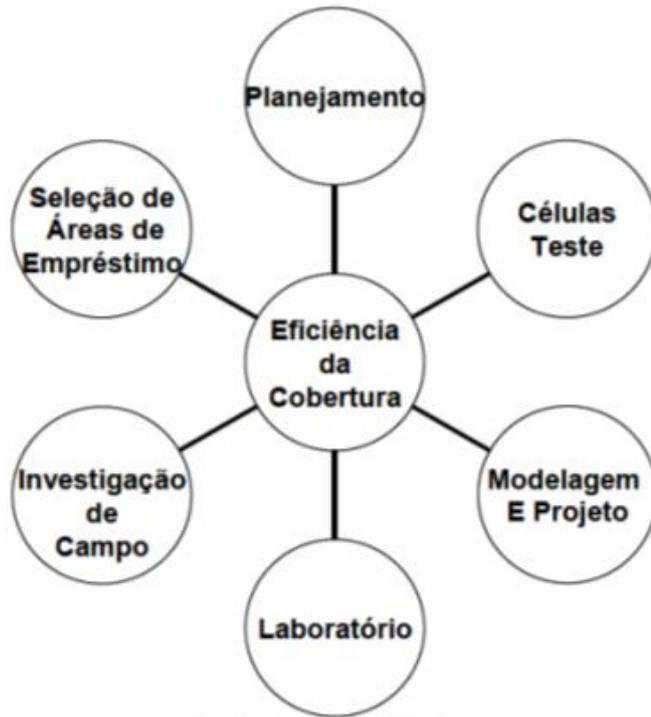


FIGURA 2.4 – Sequência de atividades para o projeto de coberturas.  
 FONTE - JUNQUEIRA *et al.*, 2011a.

### 2.5.1.1 Planejamento

A primeira etapa do projeto é sempre o planejamento inicial. Nessa fase, os seguintes aspectos são conceitualmente definidos:

- Objetivos da cobertura;
- Tipo de cobertura apropriada ao clima local;
- Critérios de projeto (infiltração máxima aceitável);
- Fontes potenciais de materiais para construção;
- Identificação das informações básicas necessárias ao projeto;
- Identificação das informações disponíveis;
- Custo máximo aceitável para manter a construção da cobertura viável.

Dependendo da resposta para as questões acima, as demais fases são detalhadas e refinadas. A fase de planejamento é constantemente revista sob a luz dos resultados obtidos nas demais etapas do projeto.

### 2.5.1.2 Seleção de áreas de empréstimo e investigações de campo

A próxima etapa consiste da identificação de áreas de empréstimo para a obtenção de material de construção para a cobertura. Essas áreas devem ser buscadas dentro de um raio máximo a partir do local do empreendimento. A extensão desse raio depende dos custos locais de aquisição e transporte do material.

Uma vez que as áreas de empréstimo sejam identificadas, o próximo passo é a realização de uma campanha de sondagem, visando estimar o volume de material disponível para a construção da cobertura. Durante as sondagens, é feita uma avaliação preliminar do tipo de material disponível (granular ou argiloso) e a coleta de amostras para ensaios de laboratório.

É importante verificar se as amostras coletadas durante a campanha de campo são representativas, de modo a assegurar que os resultados dos ensaios de laboratório possam ser utilizados para representar as condições de campo.

### 2.5.1.3 Ensaios de laboratório

O projeto de uma cobertura requer a determinação das propriedades geotécnicas e hidráulicas dos diferentes materiais a serem utilizados na construção. Os principais ensaios a serem realizados incluem:

- Densidade específica dos grãos;
- Granulometria;
- Limites de Atterberg;
- Condutividade hidráulica;
- Ensaio para obtenção da curva de retenção de umidade.

Além destes, dependendo do tipo de cobertura a ser projetada, outros ensaios como compactação e adensamento podem ser necessários. No caso de coberturas inclinadas, a resistência ao cisalhamento também é importante, bem como determinação do potencial de erodibilidade.

Um procedimento geral para a realização de ensaios de laboratório envolve:

- Realização de ensaios de granulometria e de obtenção de índices físicos na maioria das amostras coletadas no campo. Esses ensaios são geralmente baratos e podem ser utilizados para desenvolver correlações com outras propriedades dos solos necessárias ao projeto;

- Divisão dos materiais em três classes: adequados, parcialmente adequados e inadequados, seguindo-se da realização de ensaios de compactação e permeabilidade em amostras de solos classificados como adequados e parcialmente adequados. O volume estimado de material classificado como inadequado deve ser deduzido do volume total de material disponível para a construção da cobertura;
- Realização de alguns ensaios para a determinação da curva de retenção de umidade no solo em amostras específicas, com base nos resultados dos ensaios anteriores.

A estratégia de ensaios de laboratório listada acima permite a obtenção de dados chave sobre os materiais disponíveis para a cobertura. Essas propriedades são posteriormente utilizadas em modelos computacionais preparados para estimar a configuração ideal para a cobertura.

#### 2.5.1.4 Modelagem e projeto

Uma vez que a cobertura é conceitualmente definida e as características dos materiais disponíveis para construção são conhecidas, a geometria da cobertura é refinada por meio de modelos computacionais que serão apresentados no item 3.6. A modelagem numérica é utilizada para estimar o desempenho de diferentes configurações de cobertura em diferentes condições de campo como, por exemplo, variações no clima e na vegetação.

#### 2.5.1.5 Uso de células teste - escala de campo

A última etapa do projeto de uma cobertura consiste da construção de células teste em escala de campo. A geometria base definida na etapa de projeto, além de algumas variações, são construídas em áreas piloto. O desempenho de cada configuração é tipicamente monitorada por um período mínimo de 1 ano, e idealmente por um período de 3 a 5 anos.

A instrumentação necessária para o monitoramento da cobertura geralmente consiste de sensores de umidade do solo, sensores de sucção do solo e o uso de lisímetros para medição direta de infiltração através da cobertura. Além disso, é essencial a instalação de uma estação meteorológica, a qual deve ser capaz de registrar: precipitação, umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade do vento e radiação solar. O desempenho da cobertura só pode ser avaliado com o suporte de uma base confiável de dados climáticos obtidos para o período de monitoramento.

Exemplos de monitoramento de células teste e seções especiais em coberturas já construídas são descritos por Amorim (2008), Ribeiro (2011), Weeks e Wilson (2005), Junqueira *et al.* (2006) e Miskolczi e Wilson (2007).

A geometria final da cobertura é então definida com base no resultado do programa de monitoramento das células teste. Geralmente, uma segunda rodada de modelagem numérica é necessária, desta vez com a calibração do modelo baseada nos resultados do monitoramento de campo.

### 2.5.2 Metodologia proposta por ITRC (2003)

O órgão americano Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC) elaborou o guia técnico e regulatório ITRC (2003) para projeto, instalação e monitoramento de coberturas alternativas em solo baseado nas experiências adquiridas pelos membros da sua equipe. O documento, que também consiste como referência dos trabalhos de Amorim (2008) e Ribeiro (2011), afirma que devido à grande diversidade das condições climáticas, dos solos disponíveis e das variedades de espécies vegetais, é fundamental que o processo para se chegar ao projeto final seja flexível e criativo. Nesse sentido, alguns tópicos apropriados aos projetos de cobertura são sugeridos.

#### 2.5.2.1 Critérios de desempenho da cobertura

Nesta etapa devem ser discutidos os objetivos esperados pela cobertura e os critérios e premissas do projeto.

#### 2.5.2.2 Projeto preliminar/conceitual

Estão incluídas nesta etapa algumas atividades tais como: conhecimento hidrogeológico da região obtido em escala regional por pesquisa bibliográfica, dados de desempenho de experimentos já construídos em áreas próximas tais como lisímetros e/ou coberturas alternativas. Estes dados, entretanto, nem sempre estão disponíveis e o projeto preliminar poderá ser desenvolvido sem esta informação. O objetivo desta etapa de projeto é estimar as espessuras das camadas de solo da cobertura e para tanto se deve conhecer a capacidade de armazenamento dos solos que irão compor as coberturas e o regime pluviométrico da região.

### 2.5.2.3 Caracterização local

Esta etapa do projeto contempla a caracterização do local onde se implantará a cobertura incluindo os seguintes itens: conhecimento das condições climáticas locais, caracterização completa dos solos a serem utilizados na cobertura bem como do resíduo a ser coberto e caracterização da vegetação que se pretende implantar sobre a cobertura.

### 2.5.2.4 Análise de sensibilidade através de modelagem numérica

Antes de se partir para o projeto final da cobertura, é recomendável que se faça a modelagem matemática do sistema de cobertura para se verificar a sensibilidade do sistema frente à variação dos parâmetros utilizados no projeto. Após uma descrição detalhada sobre todas as singularidades dos modelos, os autores do ITRC (2003) apresentam conclusões e recomendações, e algumas delas estão sumarizadas abaixo:

- Estimativas obtidas a partir dos modelos matemáticos não têm suficiente precisão para servir de base para a regulamentação das coberturas;
- O item fluxo não deveria ser considerado sozinho como o principal resultado da modelagem numérica da cobertura. O aspecto mais importante na modelagem é a possibilidade de visualizar resultados de vários cenários através das análises de sensibilidade, em que os diversos parâmetros embutidos no projeto são modificados. Por último, o modelo deve ajudar a estabelecer um projeto mais realista com respeito à espessura das camadas de solo, grau de compactação do solo, tipos de vegetação, etc.;
- É importante utilizar valores de parâmetros de entrada realistas, mas com viés conservador, de forma a fornecerem resultados mais confiáveis para a avaliação do projeto proposto;
- Modelos que incorporam a equação de Richards (1931) deverão ser sempre utilizados em projetos de coberturas, uma vez que, na maioria dos casos, as coberturas são meios parcialmente saturados;
- Dados climáticos de entrada do modelo devem ser diários ou horários e não mensais;
- A capacidade dos modelos em estimar ou simular precisamente as medidas de campo está relacionada à limitação de cada modelo, mas também à

complexidade e ao número de fatores envolvidos nas análises, tais como: evapotranspiração, escoamento superficial e fluxos preferenciais;

- É importante e sempre recomendável a utilização de medidas diretas (se possível) ao invés de dados bibliográficos para reduzir as incertezas dos modelos nesta etapa do projeto.

#### 2.5.2.5 Projeto final

Esta etapa do projeto consiste no detalhamento dos estudos de forma que todas as hipóteses anteriormente admitidas possam ser comprovadas antes da execução da obra.

Segundo ITRC (2003), existem várias formas de se incrementar a qualidade dos dados obtidos/estimados em etapas anteriores, de forma que os mesmos se tornem mais realistas e mais precisos, passando inclusive por modelagens matemáticas mais complexas e mais detalhadas, à medida que o projeto se desenvolve e que mais dados são disponibilizados.

Uma forma de obtenção sempre desejada e nem sempre disponível seria a construção de ensaios em grande escala no campo (lisímetros), na qual seria possível materializar as características do projeto e avaliar o desempenho do sistema com o passar do tempo. Alguns projetistas reclamam que ensaios de campo levam muito tempo e são muito caros, além de não avaliar o desempenho da cobertura por um tempo suficientemente grande para fornecer dados que representem o comportamento do sistema em longo prazo.

Outros, entretanto, continuam a utilizar ensaios de campo como forma de verificar o desempenho da cobertura projetada. A partir dos resultados dos ensaios de campo é possível melhorar os resultados dos modelos numéricos, uma vez que estes podem fornecer dados mais precisos que obras análogas já construídas. Como outros métodos de avaliação, os ensaios de campo também possuem limitações, como aquelas já discutidas neste trabalho. Por exemplo: muito tempo para que a vegetação se estabeleça e se estabilize, limitação do período em que os dados hidrológicos estão disponíveis etc.

Os lisímetros seriam construídos em campo e os resultados assim obtidos serviriam para calibrar o modelo utilizado. Só então se partiria para o projeto executivo da cobertura propriamente em que os resultados dos ensaios dos lisímetros serviriam como entrada para o detalhamento do projeto do sistema de cobertura.

### 2.5.3 Metodologia proposta por Ribeiro (2011)

A metodologia recomendada por Ribeiro (2011) foi desenvolvida com base em dados obtidos em campo e modelos numéricos uni e bidimensionais de dois sistemas de cobertura inicialmente monitorados por Amorim (2008). Como conclusão final de seu trabalho, Ribeiro (2011) propõe que o projeto de sistemas de cobertura com solo seja feito conforme as seguintes etapas:

- A partir de análise tátil-visual e ensaios de caracterização, solos disponíveis nas proximidades devem ser selecionados para compor as camadas de armazenamento e liberação e a barreira hidráulica;
- Os solos escolhidos devem ser ensaiados no laboratório para determinar as suas permeabilidades saturadas e as curvas de retenção de umidade;
- Espécies nativas devem ser escolhidas para serem implantadas no topo do sistema de cobertura. Estas espécies devem ter raízes pouco profundas, até cerca de 40 cm, um índice de área foliar em torno de 2,5 a 3 e a sucção referente ao ponto de murcha entre 200 e 800 kPa;
- Em princípio, o sistema de cobertura deve ser composto de 3 camadas de solo:
  - 1) A camada superficial deve ter cerca de 15 cm e o solo deve, principalmente, ter características que facilitem a germinação e estabelecimento da cobertura vegetal;
  - 2) Abaixo dessa camada, deve-se construir a camada de armazenamento e liberação, cuja espessura deve ser estudada em análises numéricas unidimensionais como as apresentadas nesta dissertação, de forma a se obter a infiltração desejada;
  - 3) Por fim, abaixo da camada de armazenamento e liberação e sobre os resíduos, deve-se construir a camada barreira hidráulica com solo compactado com teor de umidade na umidade ótima ou pouco acima desta, de forma que se tenha um coeficiente de permeabilidade saturado menor que  $10^{-6}$  cm/s. Em princípio, esta camada pode ter 50 cm de espessura.

A FIG. 2.5 ilustra o esquema do sistema proposto por Ribeiro (2011).

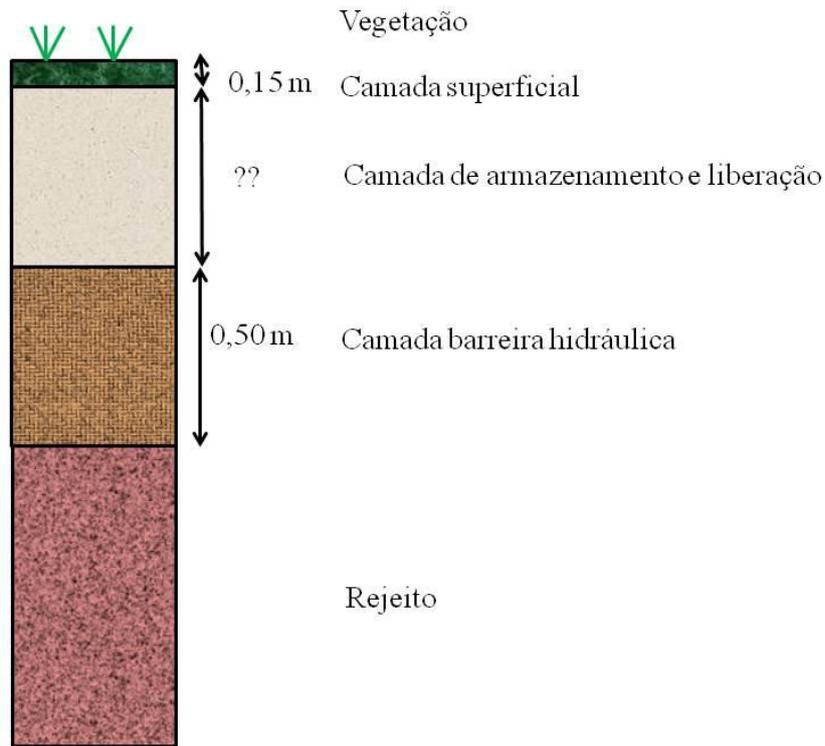


FIGURA 2.5 – Sistema de cobertura proposto por Ribeiro (2011).

## 2.6 Discussão sobre utilização de ensaios de coluna

Ensaio de coluna permitem a obtenção dos dados referentes aos fluxos de água, de temperatura e de ar em solo saturado e não saturado, além do comportamento de um determinado solo a partir do grau de compactação. Estes dados, conforme afirma Aachib (1997), permitem a determinação de características hidráulicas e de difusão de materiais de cobertura. Análises numéricas podem ser confrontadas com estas informações para calibração do modelo. Entretanto, o potencial do uso de ensaios de coluna em projetos de cobertura é limitado e inferior ao de células teste, uma vez que não permite análises acima de certa espessura (geralmente 1,5 m), não se aplica vegetação e não reproduz as condições climáticas reais de campo. Em caso de ensaios em materiais com baixa permeabilidade, estes ensaios podem levar um tempo muito longo.

Por meio deste ensaio, Aachib (1997) verificou e atestou a eficiência de coberturas multicamadas para redução da geração de DAM, porém, os casos estudados pelo autor apresentavam camadas granulares, inferiores a 1,5 m e não consideravam vegetação. Pinheiro *et al.* (2011) executaram ensaio de coluna permitindo a avaliação da percolação de líquido lixiviado com diferentes condições de compactação. Junqueira *et al.* (2011b) utilizaram este mesmo ensaio para

avaliar a influência da drenagem de fundo e da evaporação no processo de secagem em rejeito do processo de extração de petróleo de areia. O equipamento utilizado por estes autores é apresentado na FIG. 2.6 para servir de exemplo de coluna utilizada em laboratório.



FIGURA 2.6 – Ensaio de coluna.  
FONTE - JUNQUEIRA *et al.*, 2011b.

## 2.7 Desempenho em longo prazo

Sistemas de cobertura são construídos em locais sujeitos a ciclos repetitivos de variações de temperatura e de secagem e umedecimento. Esses processos causam alterações nas características originais dos materiais da cobertura e podem afetar o desempenho em longo prazo (BENSON *et al.*, 2007).

Wilson *et al.* (2003) fazem uma revisão dos principais aspectos que afetam a eficiência de diversos tipos de cobertura, conforme apresentado na TAB. 2.2. Os autores apontam ainda que solos finos de alta plasticidade são mais susceptíveis ao processo de intemperismo, enquanto solos bem graduados, com frações proporcionais de areia e materiais finos, são menos afetados por ciclos repetitivos de variação de temperatura e da umidade do solo.

TABELA 2.2 – Principais causas de falhas em sistemas de cobertura

Cobertura	Causas para baixo desempenho
Baixa permeabilidade (solos compactados)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surgimento de rachaduras associadas ao processo de intemperismo;</li> <li>- Recalques diferenciais do material coberto;</li> <li>- Intrusão de raízes e desenvolvimento de estruturas no solo compactado.</li> </ul>
Armazenamento e liberação de água	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução da porosidade do solo, e da capacidade de armazenamento de água devido a alterações na granulometria original do material, e ao adensamento do solo;</li> <li>- Falta de uma vegetação sustentável na superfície;</li> <li>- Eventos extremos de chuva.</li> </ul>
Barreira capilar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mudança nas características originais do material granular e do material fino, resultando na perda do efeito de barreira capilar;</li> <li>- Migração de material fino dentro do material granular, diminuindo a diferença entre as características físicas dos dois materiais.</li> </ul>

FONTE - WILSON *et al.* (2003).

Timms e Bennet (2000) descrevem os resultados de mais de 15 anos de monitoramento de uma cobertura composta de uma camada de solo compactada de base com 22,5 cm de espessura, sobreposta por uma camada de solo bem graduado para o armazenamento de água com aproximadamente 40 cm de espessura. A cobertura foi instalada na mina Rum Jungle, localizada no noroeste da Austrália. Os resultados indicam que a cobertura teve bom desempenho por cerca de 10 anos, com taxas de infiltração menores que 3% da precipitação anual. Porém, nos 5 anos seguintes, observou-se um aumento progressivo da infiltração para valores superiores a 10% da precipitação anual.

Os casos reportados de sistemas de cobertura monitorados por mais de 5 anos (ALBRIGHT *et al.* (2010); TIMMS E BENNET (2000); WILSON *et al.* (2003)) sugerem que projetos de cobertura devem considerar mudanças nas características dos materiais em longo prazo. Assim sendo, Junqueira *et al.* (2011a) concluem que um programa de monitoramento deve ser posto em ação por pelo menos 5 anos após a construção da cobertura e um plano de ação deve ser elaborado para recuperar as características da cobertura caso as mudanças temporais comprometam sua eficiência.

## **2.8 Estudos já realizados para utilização do rejeito como material de cobertura**

A possibilidade do uso de rejeitos e estéreis como barreiras impermeáveis é verificada por Reis *et al.* (2011) que se baseiam em uma metodologia desenvolvida por Thompson e Visser (1999), que através da determinação de índices físicos, estima o comportamento dos materiais quando utilizados como revestimentos de pavimentos. Os autores concluem que é possível a utilização de um rejeito fino como barreira impermeável desde que atenda às características físicas necessárias para tal e ainda que não apresente nenhum risco quanto à contaminação de compartimentos ambientais.

Wickland *et al.* (2006) descreve estudos que comprovam que rejeitos de mineração e estéreis podem ser combinados para formar um material resistente a erosão e com propriedades hidráulicas compatíveis com as características necessárias para coberturas como, por exemplo, alta resistência e baixa condutividade hidráulica. Miskolczi e Wilson (2007) descrevem o uso de misturas de rejeitos e estéreis na construção de coberturas piloto na mina Copper Cliff, no estado de Ontário no Canadá. Os autores concluem que a mistura apresentou excelente desempenho durante o período monitorado. Para a mesma mina do trabalho anterior, Fines e Wilson (2002), baseados em ensaios de laboratório, apresentam estudo que inclui a escória com o rejeito e o estéril e concluem que esta mistura pode proporcionar camada impermeabilizante de alta qualidade construtiva. Não foram encontradas referências sobre a utilização de somente rejeito como uma das camadas de um sistema de cobertura.

### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO PROBLEMA

O estudo da capacidade de retenção de umidade do solo é fundamental para se definir a capacidade de armazenamento de água da cobertura e a permeabilidade do solo em condições não saturadas, visto que a maioria dos sistemas de cobertura encontra-se, na maior parte do tempo, acima do lençol freático e, portanto, em condição não saturada.

A previsão do fluxo da água entre a superfície do solo e a atmosfera é um problema crítico em projetos de cobertura para rejeitos de mineração. Segundo Wilson (1990), o fluxo de umidade entre o solo e a atmosfera é um processo complexo, dominado por três fatores que funcionam como um sistema interdependente. O primeiro fator é a oferta e a demanda de água imposta na superfície do solo por condições climáticas, como precipitação, saldo da radiação solar, umidade do ar, velocidade do vento e temperatura do ar. O segundo está relacionado às propriedades do solo: condutividade hidráulica, curva característica de umidade do solo, porosidade, densidade real dos grãos, condutividade térmica e calor específico. O último trata da influência da vegetação, tais como: profundidade das raízes, índice de área foliar e ponto de murcha.

O congelamento da água presente no solo é considerado em estudos em regiões de invernos rigorosos. A presente dissertação não aborda a influência deste fenômeno.

#### 3.1 Mecânica dos solos não saturados

Inicialmente, são apresentados alguns aspectos que fundamentam a mecânica dos solos não saturados, visto que apresentam conceitos importantes em estudos de coberturas.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), a condição de não saturação ocorre em uma grande extensão do planeta, já que regiões de clima árido e semi-árido representam cerca de 60% dos países do mundo e em países de clima tropical, como o Brasil, ocorrem longos períodos secos, suficientes para causar a dessaturação do solo. A Mecânica dos Solos Clássica foi baseada em observações feitas sobre o comportamento de solos sedimentares, típicos de regiões de clima temperado. Além disso, é feita uma hipótese do solo ser um sistema estrutural bifásico, ou seja, o mesmo encontra-se saturado e, portanto, somente constituído por partículas sólidas e água. A condição não saturada faz com que o comportamento geomecânico desses solos não seja bem descrito pelos parâmetros geotécnicos convencionais, tornando tal descrição pouco realista.

Para melhor entendimento do comportamento geomecânico de solos não saturados, alguns aspectos dessa ciência da engenharia são abordados a seguir.

### 3.1.1 Fases constituintes dos solos não saturados

Um solo não saturado é considerado uma mistura de várias fases que influenciam diretamente seu estado de tensão. Uma fase é parte de uma mistura, com propriedades diferentes daquelas apresentadas pelos materiais adjacentes, possuindo também superfícies de contorno bem definidas.

Segundo Lambe e Whitman (1969), um solo não saturado é considerado como um sistema trifásico, isto é, é constituído de três fases: líquida (água), gasosa (ar) e sólida (partículas de minerais). Fredlund e Morgenstern (1977), com base na definição de fase, postulam que se deve considerar uma quarta fase independente, a interface ar-água, conhecida também como membrana contrátil. A FIG. 3.1 mostra um modelo idealizado de solo não saturado.

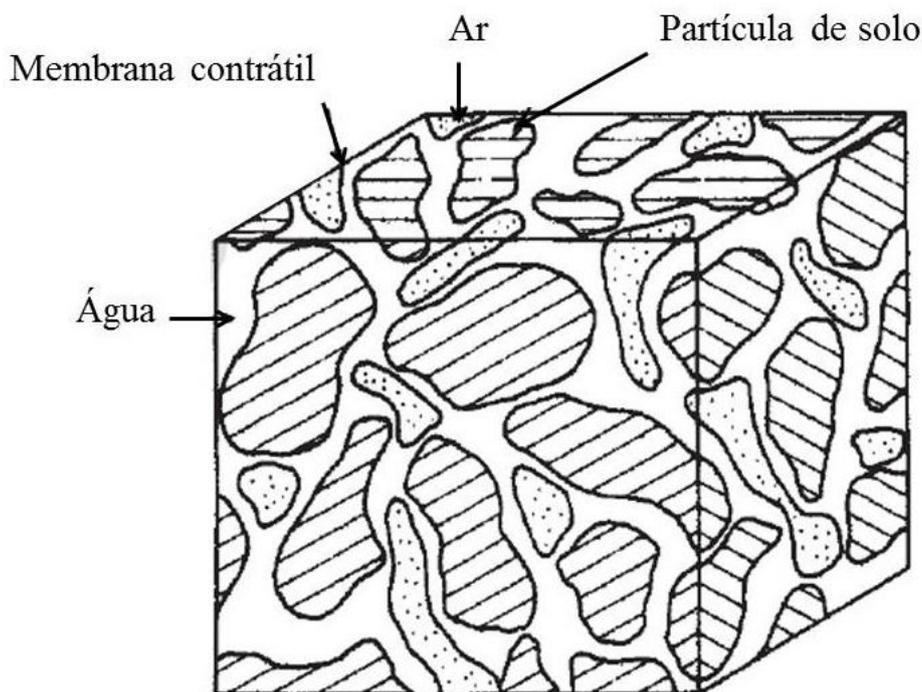


FIGURA 3.1 – Elemento de solo não saturado com a fase gasosa contínua.  
FONTE - FREDLUND E RAHARDJO,1993.

Fredlund e Rahardjo (1993) complementam que a característica mais importante da membrana contrátil é a possibilidade da mesma exercer uma tensão de tração nos materiais adjacentes, denominada tensão superficial. Devido à ação dessa tensão, a interface ar-água comporta-se como uma membrana elástica. Se a fase gasosa for contínua, tal membrana interage

com as partículas sólidas, influenciando no comportamento mecânico do solo. Do ponto de vista comportamental, o solo não saturado pode ser considerado um sistema de duas fases que entram em equilíbrio (partículas de solo e membrana contrátil) e outras duas que fluem (ar e água) ao se aplicar um gradiente de tensão. Nas correlações massa-volume, é possível considerá-lo um sistema trifásico, visto que o volume da interface ar-água é muito pequeno e sua massa pode ser considerada como parte da massa de água. Entretanto, quando se analisa o estado de tensão de um sistema multifásico contínuo é necessário supor que a interface ar-água se comporte como uma fase independente.

### 3.1.2 Sucção

Um dos principais fatores de alteração do comportamento mecânico dos solos não saturados é o aparecimento de uma pressão de água negativa nos poros, chamada de sucção. Assim, para uma previsão mais próxima da situação real e bom entendimento do comportamento de campo, estudos em solos não saturados devem considerar tal componente.

Marinho (1997) define a sucção como sendo a pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água/solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação. Em outras palavras, a sucção é uma tensão usada para avaliar a capacidade do solo de reter água.

#### 3.1.2.1 Componentes da sucção

Quando ocorre fluxo da água livre num solo não saturado, a mesma poderá ser retida ou adsorvida por ele. Neste caso, é necessária a aplicação de uma força externa para desprendê-la. Tal energia aplicada por unidade de volume de água é denominada sucção. A energia disponível para realizar este trabalho pode ser descrita em termos de potencial equivalente, chamado de potencial total ( $\phi_t$ ).

Aitchison (1965) dividiu esse potencial em parcelas menores de acordo com a EQ. 3.1.

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m + \phi_g + \phi_a + \phi_p \quad (3.1)$$

Em que:

$\phi_o$  = o potencial osmótico ou de soluto, associado à pressão osmótica da água do solo;

$\phi_m$  = o potencial mátrico, resultante de forças capilares ou de adsorção;

$\phi_g$  = o potencial gravitacional, obtido pela elevação do ponto em questão relativa ao nível de referência;

$\phi_a$  = o potencial pneumático, respectivo à pressão na fase gasosa;

$\phi_p$  = o potencial de adensamento, associado à sobrecarga aplicada no terreno, transmitida pela água intersticial.

Algumas considerações podem ser feitas a fim de simplificar a EQ. 3.1. O potencial gravitacional é desprezível, assim como o potencial de adensamento, se não há processo de adensamento. Se for admitido que os poros do solo estejam interligados com a atmosfera, também se torna irrelevante a parcela de potencial pneumático. Assim a EQ. 3.1 pode ser reescrita conforme a EQ. 3.2:

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m \quad (3.2)$$

Pode-se também escrever a equação acima em termos de suas pressões equivalentes. Esses potenciais, osmótico e matricial, são equivalentes à sucção osmótica e à sucção matricial respectivamente. Assim, conforme EQ. 3.3, a sucção total ( $S_t$ ) é a soma das pressões associadas aos potenciais anteriormente descritos.

$$S_t = S_o + S_m \quad (3.3)$$

Em que:

$S_t$  = sucção total (kPa);

$S_o$  = sucção osmótica (kPa);

$S_m$  = sucção matricial (kPa).

A sucção matricial é definida como a pressão negativa da água intersticial devido aos efeitos da capilaridade e das forças de adsorção. É referente à matriz do solo, isto é, à combinação do tipo de partículas e do arranjo estrutural do solo. Marinho (2005) afirma que a sucção matricial é dada pela diferença entre a pressão atmosférica (ou pressão no ar) e a pressão na água. A sucção osmótica está associada à pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água livre. Blight (1983) afirma que esta parcela da sucção total está diretamente relacionada à ocorrência de diferenças de concentração de solutos na água intersticial.

Através de ensaios triaxiais com sucção controlada, Edil *et al.* (1981) comprovaram que, essencialmente, apenas a sucção matricial afeta o comportamento do solo não saturado. Outros pesquisadores, como Fredlund (1979) e Alonso *et al.* (1987), confirmam que tal componente seria suficiente para descrever o comportamento mecânico do solo na condição não saturada.

### 3.1.2.2 Métodos para medição da sucção

A medição da sucção motivou várias pesquisas tanto para desenvolver métodos de medição quanto para testar a sua eficácia. Para isso, os dispositivos devem interagir de alguma forma com o solo, direta ou indiretamente. Dessa forma, podem ser classificados como métodos diretos aqueles que medem a energia da água dos poros. Nos métodos indiretos, obtém-se um parâmetro a ser correlacionado com a sucção do solo através de uma calibração, por exemplo, umidade relativa, resistividade ou condutividade (LOPES, 2006).

As técnicas mais utilizadas no meio geotécnico para obtenção da curva de retenção de umidade foram descritas por vários autores como, por exemplo, de Fredlund e Rahardjo (1993), de Campos (1994), Marinho (1997) e Ridley e Wray (1996). A TAB. 3.1 apresenta estas principais técnicas.

TABELA 3.1 – Técnicas para a medição da sucção em solos.

<b>Técnica</b>	<b>Medida de sucção</b>	<b>Intervalo (kPa)</b>	<b>Tempo de equilíbrio</b>
Psicrômetro	total	100 a 71000	minutos
Papel filtro (com contato)	matricial	30 a 30000	7 dias
Papel filtro (sem contato)	total	400 a 30000	7-14 dias
Bloco poroso	matricial	30 a 30000	semanas
Sensor de condutividade térmica	matricial	0 a 300	semanas
Placa de sucção	matricial	0 a 90	horas
Placa de pressão	matricial	0 a 1500	horas
Tensiômetro padrão	matricial	0 a 100	minutos
Tensiômetro osmótico	matricial	0 a 1500	horas
Tensiômetro tipo Imperial College	matricial	0 a 1800	minutos

FONTE - FREDLUND E RAHARDJO, 1993.

No presente trabalho, foi utilizado o método do papel filtro para se obter as curvas de retenção de umidade do rejeito. O método foi normalizado pela ASTM em 1993 e aceito como uma técnica indireta de medição da sucção em solos cujo princípio básico consiste na habilidade de meios porosos de absorver ou perder certa quantidade de água quando estão em contato, direto ou indireto, em um ambiente fechado, até entrarem em equilíbrio de pressão. Nesse ponto de equilíbrio, os valores de umidade do solo e do papel filtro são diferentes, porém, possuem a mesma sucção. O equilíbrio é atingido quando o fluxo de fluido ou vapor cessa. Se a água trocada pelo sistema é em forma de vapor, estará medindo a sucção total. Caso o fluxo seja de líquido, a sucção medida é a matricial (LOPES, 2006). Os ensaios foram realizados conforme metodologia proposta por Villar (2002), onde são colocados papeis no topo e na base da amostra. Foi utilizado o papel filtro Whatman nº 42, visto que, segundo Chandler e Gutierrez (1986), é o mais recomendado por ser mais espesso e possuir poros menores.

### 3.1.2.3 Curva de retenção de umidade

A expressão gráfica da relação constitutiva entre o teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) do solo e a sucção é chamada de curva de retenção de umidade, curva de retenção de água ou curva característica de sucção, que também pode ser expressa em termos do grau de saturação do solo. Considerando a sucção, a curva pode ser escrita em função da sucção matricial ou da sucção total. A forma de como expressar a sucção ou a quantidade de água do solo fica a critério do autor e do tipo de problema a ser resolvido. Obtêm-se os pontos desta curva pelo uso de uma ou mais técnicas de medição de sucção em solos, citadas anteriormente. Conforme Lopes (2006), os diversos métodos de medição de sucção em solos fornecem resultados semelhantes, desde que bem calibrados e executados.

A distribuição granulométrica do solo é um dos fatores que afeta a relação sucção-umidade. Normalmente, quanto maior a quantidade da fração argila maior será o teor de umidade para um mesmo valor de sucção (Fredlund *et al.*, 1994). Isso se deve ao fato dos solos mais argilosos possuírem vazios muito pequenos, o que aumenta o efeito da capilaridade. Também se pode atribuir este efeito à maior superfície específica apresentada pelos grãos menores, o que implica num aumento das forças de adsorção.

Outro ponto relevante abordado por Lopes (2006) é a uniformidade dos poros de solos argilosos, que faz com que a relação entre a sucção e a quantidade de água retida seja gradual devido a esses poros estarem menos interconectados. Quando se analisa solos arenosos, observa-se

que eles não possuem essa relação gradual, e sim uma variação brusca na curva característica de sucção. Basicamente, isso se deve a presença de poros maiores nos solos arenosos e mais conectados, uma vez estes solos mostram uma tendência de mudar o grau de saturação rapidamente à medida que a sucção aumenta quando comparados aos argilosos. Quanto mais uniforme a granulometria do solo arenoso, mais abrupta será a variação entre a umidade e a sucção (VANAPALLI *et al.*, 1999).

As curvas de retenção de umidade típicas para areias, siltes e argilas são apresentadas no GRAF. 3.1.

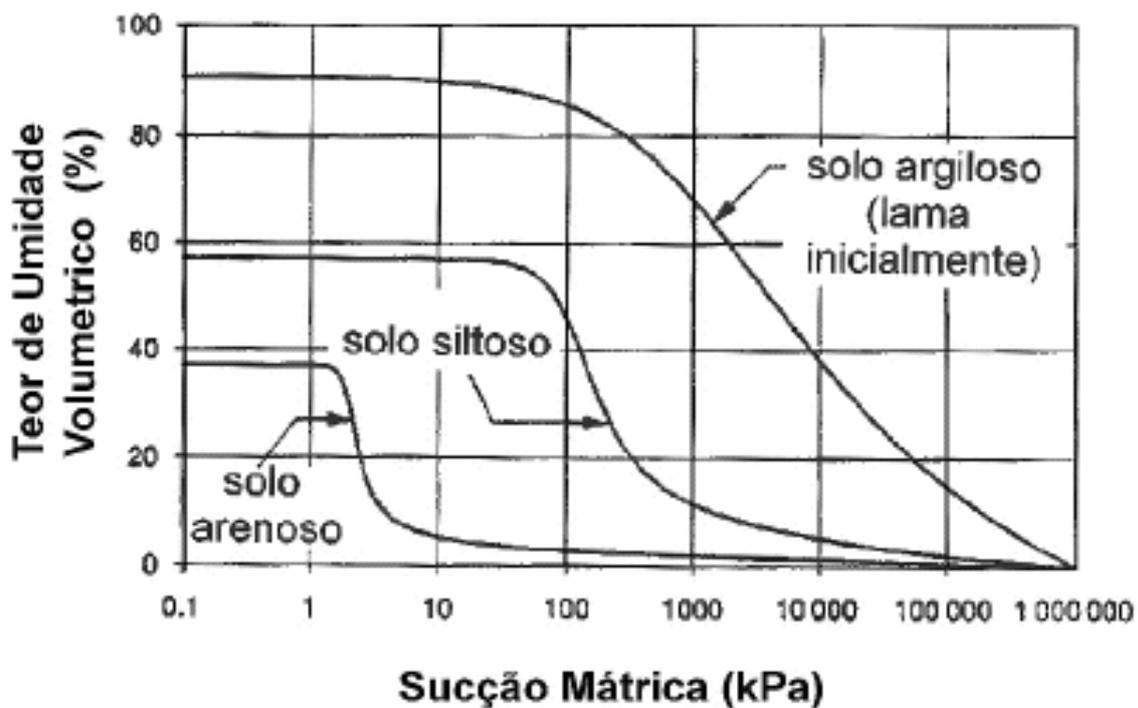


GRÁFICO 3.1 – Curvas de retenção de umidade típicas para areias, siltes e argilas.  
FONTE - FREDLUND *et al.*, 1994.

#### 3.1.2.4 Ajustes dos pontos obtidos em ensaios

A partir de pontos de correlação entre sucção e teor de umidade volumétrico obtidos experimentalmente, foram propostos diversos métodos para ajustar a curva de retenção de umidade. Descrevem-se, a seguir, dois métodos que serão abordados neste trabalho.

## Método proposto por Van Genuchten (1980)

Van Genuchten (1980) propõe a EQ. 3.4 para ajuste da curva de retenção de umidade.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (3.4)$$

Em que:

$\theta$  = teor de umidade volumétrico;

$\theta_r$  = teor de umidade volumétrico residual;

$\theta_s$  = teor de umidade volumétrico do solo saturado;

$\Psi$  = sucção (kPa);

$a, n, m$  = parâmetros de ajuste da curva.

Os parâmetros de ajuste da curva por Van Genuchten (1980) são representados pelas EQ. 3.5 a 3.9.

$$m = 1 - \exp(-0,8S_p) \quad (0 < S_p \leq 1) \quad (3.5)$$

$$m = 1 - \frac{0,5755}{S_p} + \frac{0,1}{S_p^2} + \frac{0,025}{S_p^3} \quad (S_p > 1) \quad (3.6)$$

$$n = \frac{1}{m - 1} \quad (3.7)$$

$$a = \frac{\Psi_p}{(2^{1/m} - 1)^{1-m}} \quad (3.8)$$

$$S_p = \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \left| \frac{d\theta}{d(\log \Psi)} \right| \quad (3.9)$$

Em que:

$\Psi_p$  = valor que a tangente da curva corta o eixo da sucção (kPa);

$S_p$  = inclinação da curva tangente à curva.

## Método proposto por Fredlund e Xing (1994)

Fredlund e Xing (1994) propõem a EQ. 3.10 para ajuste da curva de retenção de umidade.

$$\theta = C(\psi) \cdot \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ 2,71828 + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (3.10)$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + (1000000/\psi_r)]}$$

Em que:

$C(\psi)$  = função de correção que considera o limite superior de sucção;

$\psi_r$  = valor de sucção correspondente ao teor de umidade volumétrico residual (kPa);

$a, n, m$  = parâmetros de ajuste da curva.

O parâmetro  $a$ , que tem unidades em kPa, é o ponto de inflexão da função do teor de umidade volumétrico e geralmente é ligeiramente maior do que o valor de entrada de ar. O parâmetro  $n$  controla a inclinação desta função e o parâmetro  $m$  controla o teor de umidade residual. Os parâmetros de ajuste da curva por Fredlund e Xing (1994) são representadas pelas EQ. 3.11 a 3.14.

$$a = \psi_i \quad (3.11)$$

$$m = 3,67 - \ln \left( \frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \quad (3.12)$$

$$n = \frac{1,31^{m+1}}{m\theta_s} 3,72s\psi_i \quad (3.13)$$

$$s = \frac{\theta_1}{\Psi_p - \Psi_i} \quad (3.14)$$

Em que:

$\Psi_i$  = valor de sucção no ponto de inflexão (kPa);

$\Psi_p$  = intercepto da linha tangente no eixo da sucção matricial (kPa);

$\theta_i$  = teor de umidade volumétrico no ponto de inflexão;

$\theta_s$  = teor de umidade volumétrico no ponto inicial;

s = inclinação da linha tangente à função que passa pelo ponto de inflexão.

O GRAF. 3.2 apresenta a solução gráfica para determinação dos parâmetros de ajuste.

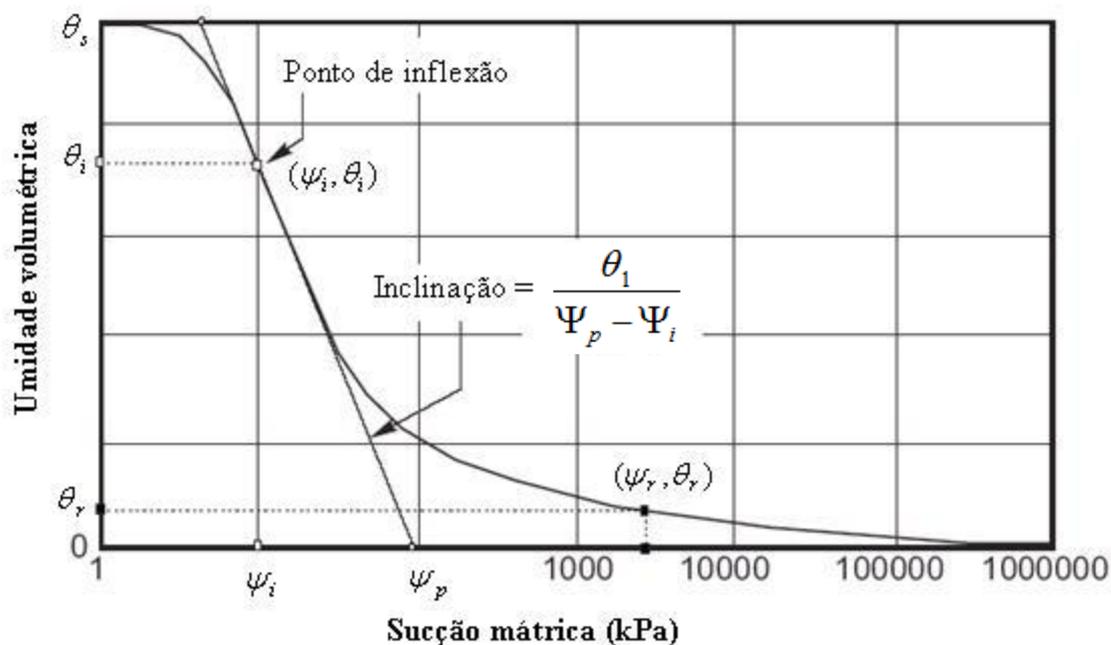


GRÁFICO 3.2 – Solução gráfica para determinação dos parâmetros de ajuste.  
FONTE - FREDLUND E XING, 1994.

Fredlund e Xing (1994) definem o teor de umidade volumétrico residual ( $\theta_r$ ) como o encontro das tangentes das partes médias e finais, porém recomendam que os cálculos sejam realizados conforme o GRAF. 3.2. A influência desta variação nos resultados não é verificada neste trabalho, entretanto vale ressaltar a diferença destes conceitos.

### 3.1.2.5 Função da permeabilidade não saturada

A permeabilidade do solo não saturado é função da variação da quantidade de água que o solo apresenta em seus poros. Essa quantidade é refletida pelo grau de saturação ou teor de

umidade volumétrico do solo e se relaciona com a sucção por meio da curva de retenção de umidade do solo. A função que descreve a variação do coeficiente de permeabilidade com o teor de umidade volumétrico do solo é chamada função de permeabilidade e depende da forma como o solo retém água (FREDLUND E RAHARDJO, 1993).

Segundo Vieira (2005), a função de permeabilidade do solo pode ser obtida de forma aproximada por meio da medição do teor de umidade volumétrico ou da sucção do solo com a profundidade em colunas de solo. As medidas devem ser tomadas em distâncias tais que a variação da sucção entre dois pontos consecutivos seja a menor possível. Ainda segundo o autor, a obtenção da função de permeabilidade de materiais em problemas de fluxo em meios não saturados é pouco realizada por ser complexa e dispendiosa, demandando bastante tempo, equipamento e pessoal especializados. Com isso, o uso de modelos para a obtenção da função de permeabilidade para simular fluxo em meios não saturados é bastante comum devido à simplicidade e rapidez.

Vários pesquisadores desenvolveram equações analíticas, experimentais e estatísticas para descrever a função de permeabilidade do solo por meio do uso da curva de retenção de umidade. Dentre os diversos modelos utilizados, serão apresentados os modelos de Van Genuchten (1980) e de Fredlund *et al.* (1994).

#### Método proposto por Van Genuchten (1980)

Van Genuchten (1980) propõe a EQ. 3.15 para obtenção da permeabilidade não saturada em função da sucção.

$$k = k_s \frac{\left\{ 1 - \left( \frac{\Psi}{a} \right)^{n-1} \left[ 1 + \left( \frac{\Psi}{a} \right)^n \right]^{-m} \right\}^2}{\left[ 1 + \left( \frac{\Psi}{a} \right)^n \right]^{m/2}} \quad (3.15)$$

Em que:

$a, m, n$  = parâmetros de ajuste da curva de retenção de umidade;

### Método proposto por Fredlund *et al.* (1994)

Já Fredlund *et al.* (1994) propõem a EQ. 3.16 para obtenção da permeabilidade não saturada em função da sucção.

$$k = k_s \frac{\int_{\ln(\Psi)}^b \frac{\theta(e^{1,y}) - \theta(\Psi)}{e^{1,y}} \theta'(e^{1,y}) dy}{\int_{\ln(\Psi_a)}^b \frac{\theta(e^{1,y}) - \theta_s}{e^{1,y}} \theta'(e^{1,y}) dy} \quad (3.16)$$

Em que:

- $\psi_a$  = sucção no ponto de entrada de ar (kPa);
- $\theta'$  = derivada primeira da equação;
- $e''$  = número de Euler, constante igual à 2,71828;
- $b$  = limite superior da integração, igual à  $\ln(1.000.000)$ ;
- $y$  = variável de integração que representa o logaritmo da sucção.

#### 3.1.2.6 Determinação da curva de retenção de umidade a partir da curva granulométrica

A obtenção do teor de umidade em função da sucção não é difícil de ser realizada em laboratório, porém requer muito tempo e nem todos os laboratórios realizam este serviço. Entretanto, a obtenção da curva granulométrica é simples, relativamente rápida e é realizada em todos os laboratórios que realizam ensaios geotécnicos.

Aubertin *et al.* (2003), a partir do método proposto por Kovács (1981), apresentam um método modificado que estima a função do teor de umidade volumétrico ( $\Theta$ ) a partir de propriedades básicas do solo. Inicialmente, essa estimativa é feita a partir do grau de saturação, da porosidade e, em seguida, é convertida em função a partir da relação apresentada na EQ. 3.17.

$$\Theta = S.n \quad (3.17)$$

Em que:

- $S$  = grau de saturação;
- $n$  = porosidade.

A metodologia é representada pelas EQ. 3.18 e 3.19 e é desenvolvida a partir da decomposição do grau de saturação em dois componentes principais. O primeiro componente contribui para a quantidade de água que é armazenada num solo por forças capilares existentes em pequenos valores de poropressão negativos ( $S_c$ ). O segundo componente contribui para a função do teor de umidade volumétrico para grandes valores de poropressão negativos ( $S_a^*$ ) nos quais a quantidade de água que existe no solo é principalmente uma função da adesão. Ambos componentes podem ser avaliados a partir da poropressão negativa e de propriedades do material como o tamanho e a forma da partícula e a porosidade.

$$S = S_c + S_a^*(1 - S_c) \quad (3.18)$$

$$S_a^* = 1 - \langle 1 - S_a \rangle \quad (3.19)$$

Em que:

$S_c$  = grau de saturação devido à forças capilares;

$S_a$  = adesão;

$S_a^*$  = grau de saturação devido à adesão.

A adesão tem um valor limitado uma vez que, para baixos valores de sucção, é possível que o valor de  $S_a$  seja maior do que 1. O valor limitado assegura que, para valor de  $S_a$  maior ou igual a 1,  $S_a^* = 1$ , e para  $S_a$  inferior a 1,  $S_a^* = S_a$ .

A componente de adesão está associada com a fina película de água que cobre a superfície do grão do solo e depende de propriedades básicas dos materiais como a sucção e a granulometria das partículas, a forma e a porosidade do solo. Ela é determinada pela EQ. 3.20:

$$S_a = aC_\psi \frac{\left(\frac{h_{co}}{\psi_n}\right)^{2/3}}{e^{1/3} \left(\frac{\psi}{\psi_n}\right)^{1/6}} \quad (3.20)$$

Em que:

$a$  = parâmetro de ajuste;

$C_\psi$  = coeficiente de correção;

$\Psi$  = sucção (kPa);

$\Psi_n$  = parâmetro de sucção inserido para garantir um componente adimensional (kPa);

$e$  = índice de vazios;

$h_{co}$  = altura da franja capilar (cm), definida por:

$$h_{co} = \frac{b(cm^2)}{eD_{10}(cm)}$$

$D_{10}$  = diâmetro da partícula que corresponde a 10% passante na curva granulométrica;

$$b(cm^2) = \frac{0,75}{1,17 \log C_u + 1}$$

$C_u$  = coeficiente de uniformidade;

A saturação capilar, que depende essencialmente do diâmetro e da distribuição dos poros, é dada pela EQ. 3.21.

$$S_c = 1 - \left[ \left( \frac{h_{co}}{\Psi} \right)^2 + 1 \right]^{m'} \exp \left[ -m' \left( \frac{h_{co}}{\Psi} \right)^2 \right] \quad (3.21)$$

Em que:

$m'$  = parâmetro de ajuste associado à distribuição dos poros.

As camadas de cobertura são construídas por solos compactados e não em sua condição de compactação natural. Solos compactados podem ter curva de retenção tipo bi-modal, porém o modelo de Aubertin *et al.* (2003) apresenta resultados apenas com curva de retenção do tipo modal. O grau de compactação do solo é relacionado com curva de retenção de umidade pelo índice de vazios que é um dos parâmetros de entrada.

### 3.2 Cálculo do fluxo de umidade no solo não saturado

O fluxo de umidade refere-se ao deslocamento do ar, do vapor e da água no solo. Segundo Wilson *et al.* (1994), o fluxo de água líquida no solo pode ser descrito pela Lei de Darcy (EQ. 3.22) e os fluxos de ar e vapor de água podem ser descritos pela Lei de Fick (EQ. 3.23).

$$q_l = -k \frac{\partial h_w}{\partial y} \quad (3.22)$$

Em que:

$q_l$  = fluxo vertical de água que atravessa uma unidade de área da secção transversal por unidade de tempo (m/s);

$k$  = condutividade hidráulica do solo não saturado (m/s);

$h_w$  = carga hidráulica (m).

$$q_v = -D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \quad (3.23)$$

Em que:

$q_v$  = fluxo de vapor d'água ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ );

$D_v$  = coeficiente de difusão do vapor d'água através do solo ( $\text{kg} \cdot \text{m/kN} \cdot \text{s}$ );

$P_v$  = pressão parcial devido ao vapor d'água (kPa).

Ribeiro (2011) observa que o fluxo de moléculas de vapor de água não é restrito ao ar contido nos poros do solo não saturado. Moléculas de vapor de água também podem fluir para ou da fase líquida contida nos poros do solo não saturado. Esse fluxo que se dá através da película contrátil (ou menisco) é definido como fluxo de interface e deve ser considerado juntamente com os mecanismos de difusão e advecção.

A difusão das moléculas de água se deve a um gradiente na pressão do vapor de água, análogo à difusão de um soluto químico em água sob um gradiente de concentração. A advecção das moléculas de água na fase vapor por meio do fluxo de ar na estrutura dos poros é causado por um gradiente na pressão total de ar, análogo à advecção de um soluto químico em água corrente sob um gradiente hidráulico.

A partir da Lei de Darcy (EQ. 3.22) e da Lei de Fick (EQ. 3.23), Wilson (1990) considerou os fluxos de ar, de vapor devido à difusão, de vapor devido à advecção e de água no solo, denominou como fluxo de umidade e simplificou em apenas uma equação diferencial (EQ. 3.24).

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = C_w^1 \frac{\partial}{\partial y} \left( k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + C_w^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (3.24)$$

Em que:

$$C_w^1 = \frac{1}{(\gamma_w)^2 g m_2^w}$$

$$C_w^2 = \frac{(P + P_v)}{P (\gamma_w)^2 g m_2^w}$$

$m_1^w$  = A inclinação da curva  $(\sigma_y - u_a)$  versus volume de água quando  $(u_a - u_w)$  é zero;

$m_2^w$  = A inclinação da curva  $(u_a - u_w)$  versus volume de água quando  $(\sigma_y - u_a)$  é zero;

$P$  = pressão total na fase de massa de ar (kPa);

$C_w$  = coeficiente de consolidação.

### 3.3 Cálculo do fluxo de calor no solo

O fluxo de calor no solo ocorre por meio de três mecanismos: condução, convecção e calor latente devido à mudança de fase. A condução de calor é o transporte de calor entre as partículas de solo e através dos fluidos dos poros. A transferência condutiva de calor ocorre independente de haver transporte de massa. O fluxo de calor por meio de convecção é feito por transferência de massa na fase ar e nas fases de vapor e líquida da água. A transferência de calor latente é a energia consumida ou liberada quando a água no solo muda da fase líquida para vapor, ou vice-versa.

A lei da condução térmica, também conhecida como Lei de Fourier, estabelece que o fluxo de calor através de um material é proporcional ao gradiente negativo de temperatura. Wilson (1990), desprezando o fluxo de calor convectivo, simplificou o fluxo de calor no solo em apenas uma equação diferencial (EQ. 3.25).

$$C_v \gamma_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L_v \left( \frac{P + P_v}{P} \right) \frac{\partial}{\partial y} \left( D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (3.25)$$

Em que:

$T$  = temperatura do solo ( $^{\circ}\text{K}$ );

$\lambda$  = condutividade térmica;

$L_V$  = calor latente de vaporização (J/kg).

Os conceitos dos parâmetros térmicos, condutividade térmica e calor específico volumétrico, são importantes no desenvolver desta dissertação. A condutividade térmica reflete a capacidade do solo em conduzir calor assim como a condutividade hidráulica reflete a capacidade do solo em conduzir água. A taxa na qual o calor é transferido depende do gradiente de temperatura e da condutividade térmica do solo. A condutividade térmica de um solo pode ser definida como a quantidade de calor que flui através de uma unidade de área de solo em uma unidade de tempo, sob uma unidade de gradiente térmico. Calor específico volumétrico é a quantidade de calor necessária para variar a temperatura de um metro cúbico de solo em  $1^{\circ}\text{C}$ . Quando expressa em termos de unidade de peso, esta quantidade de calor é referida como a capacidade de calor específico e, quando expressa em termos de unidade de volume, a quantidade é conhecida como a capacidade de calor volumétrico.

### 3.4 Cálculo da evaporação

A evaporação potencial ( $E_0$ ) pode ser calculada pela equação de Dalton (EQ. 3.26). No entanto, a aplicação desta equação em problemas de campo é difícil devido à dificuldade em se obter a função  $f(u)$ .

$$E_0 = f(u)(e_s - e_a) \quad (3.26)$$

Em que:

$E_0$  = evaporação potencial (mm/dia);

$f(u)$  = função de fluxo turbulento que depende das características do ar acima da superfície evaporativa;

$e_s$  = pressão de vapor na superfície da água (mm.Hg ou kPa);

$e_a$  = pressão de vapor do ar acima da superfície da água (mm.Hg ou kPa).

Penman (1948), a partir da equação de Dalton, propôs a EQ 3.27 para calcular as taxas de evaporação fornecendo um método relativamente simples para determinar a função  $f(u)$  com base na velocidade do vento.

$$E = \frac{\Gamma Q + E_a \nu}{\Gamma + \nu} \quad (3.27)$$

Em que:

$$E_a = f(u)(e_{sa} - e_a);$$

$$f(u) = 0.35(1 + 0.15U_a) \text{ (mm}^3\text{/kN.dia);}$$

$$U_a = \text{velocidade do vento (km/h);}$$

$$e_{sa} = \text{pressão de vapor de saturação da temperatura média do ar, usualmente (mm.Hg);}$$

$\Gamma$  = inclinação da curva pressão de vapor de saturação *versus* temperatura na temperatura média do ar;

$$Q = (1 - A) I_s - e' [I_{ld} - \tau T_s^4] \text{ é a energia radiante disponível na superfície (mm/dia);}$$

$A$  = Albedo (medida da reflexão das ondas curtas solares:  $A=1$  reflexão total;  $A=0$  nenhuma reflexão);

$I_s$  = radiação de ondas curtas recebidas;

$e'$  = emissividade (capacidade de um objeto emitir ondas infra-vermelhas. Varia entre 0, refletida por um espelho, até 1, corpo negro teórico. Nos solos é da ordem de 0.9 a 0.98) ( $\mu\text{m}$ );

$I_{ld}$  = radiação atmosférica de ondas longas recebidas;

$$\tau = \text{constante de Stefan-Boltzman (5.67x10}^{-8} \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-4}\text{);}$$

$T_s$  = temperatura da superfície do solo ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\nu$  = constante psicrométrica ( $0,0008 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , psicrômetro não-aspirado).

Segundo Ribeiro (2011), a principal vantagem do Método de Penman é necessitar somente de parâmetros meteorológicos de rotina tais como temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. A principal desvantagem do método é que calcula a evaporação potencial (máxima), assumindo que a água está disponível livremente, ou seja, como se o solo se mantivesse constantemente saturado. Com isso, o método superestima a evaporação em superfícies de solos não saturados. Essa deficiência pode ser superada se a umidade relativa na superfície do solo não

saturado for conhecida. Wilson (1990) desenvolveu a EQ. 3.28 para calcular a evaporação em solos não saturados baseado na equação de Penman.

$$E = \frac{\Gamma Q + E_a \nu}{\Gamma + \nu A} \quad (3.28)$$

Em que:

$$E_a = f(u) e_a (B - A)$$

$$A = 1/h_r;$$

$$B = 1/h_a;$$

$$h_a = \text{umidade relativa do ar (\%)}$$

Quando a umidade relativa na superfície de um solo saturado ( $h_s$ ) for igual a 100%, o valor de “A” será igual a 1. Portanto, a formulação de Penman modificada por Wilson (1990) (EQ. 3.28) reduz-se à equação de Penman convencional (EQ. 3.27) quando a superfície do solo se encontra saturada.

Por fim, a evaporação real (E) calculada pela EQ. 3.28, é modificada pela EQ. 3.29 de tal forma que uma parcela da energia seja compartilhada com a vegetação.

$$E = \frac{\Gamma Q + E_a \nu}{\Gamma + \nu A} \exp(-0,4.IAF) \quad (3.29)$$

### 3.5 Cálculo da transpiração

A transpiração real (Tr) é calculada conforme EQ. 3.30 proposta por Wilson *et al.* (1994).

$$Tr = \frac{2 \left[ E \left( -0,21 + 0,7 \sqrt{IAF} \right) \right]}{R_T} \left( 1 - \frac{y}{R_T} \right) A_n FPM \quad (3.30)$$

Em que:

$$R_T = \text{espessura total da zona de raiz (m);}$$

$$y = \text{profundidade (m);}$$

$A_n$  = área de contribuição do ponto em questão ( $m^2$ );

$FPM$  = função que relaciona a capacidade da planta retirar água do solo com a sucção no solo.

O fluxo de água é definido pela diferença entre precipitação e a evapotranspiração, calculada pela soma das EQ. 3.29 e 3.30. Se esse balanço for negativo, um fluxo negativo (evaporativo) é aplicado na superfície. Se o balanço for positivo, um fluxo positivo (infiltração) é aplicado na superfície, o problema é resolvido e as cargas de pressão na superfície são calculadas. Ainda no mesmo intervalo de tempo, o problema volta a ser resolvido, só que com a condição de cargas de pressão prescritas na superfície ao invés de fluxo prescrito. Nessa condição, o fluxo na superfície é calculado e a solução é repetida até que a carga de pressão aplicada gere um fluxo igual à infiltração. Quando isso ocorre, o escoamento superficial é calculado igual à precipitação, menos a evapotranspiração, menos a infiltração e a solução prossegue para um outro intervalo de tempo (RIBEIRO, 2011).

### 3.6 Soluções numéricas

Existe uma variedade de programas computacionais capazes de solucionar as equações que representam o fluxo de água em meios não saturados e que, portanto, podem ser empregados em projetos de cobertura. A TAB. 3.2 apresenta os principais programas disponíveis.

TABELA 3.2 – Programas mais utilizados em projetos de coberturas.

<b>Programa</b>	<b>Fonte</b>	<b>Dimensão</b>
SVFlux	Soil Vision System	1D, 2D e 3D
VADOSE/W	GeoStudio	1D e 2D
Hydrus	USDA (US Department of Agriculture)	2D
UNSAT-H	PNNL (Pacific Northwest National Laboratory)	1D
LEACHM	Flinders University of South Australia	1D
SoilCover	Universidade de Saskatchewan (Canadá)	1D

FONTE - JUNQUEIRA *et al.* (2011a).

Métodos para avaliar as limitações de cada modelo podem ser encontrados nos artigos na literatura citados por Junqueira (2011a) (i.e. BENSON (2010), BOHNHOFF *et al.* (2009), KHIRE *et al.* (1997), OGORZALEK *et al.* (2008) e SCANION *et al.* (2002)).

Este trabalho utiliza o programa VADOSE/W para execução das análises numéricas. Tentou-se utilizar o programa SoilCover para se confrontar com o resultado do VADOSE/W, porém não foi obtido sucesso devido à dificuldade de entrada dos dados. Seguem as apresentações destes dois programas.

### 3.6.1 Apresentação do SoilCover

O SoilCover é programa computacional que usa um modelo matemático unidimensional na simulação do movimento de água de um sistema cobertura, o qual está sujeito à infiltração e evapotranspiração na superfície do solo. O modelo prevê a troca de água e energia entre a atmosfera e a superfície do solo, além de simular o fluxo da evaporação em solos saturados e não saturados com base em condições atmosféricas, cobertura vegetal e as propriedades do solo.

O programa foi desenvolvido e é comercializado pelo Grupo de Solos Não Saturados da Universidade de Saskatchewan no Canadá. A plataforma utilizada é o Excel da Microsoft Corporation. A teoria que fundamenta a base do programa foi desenvolvida no ano de 1990, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Saskatchewan, como parte da tese do Dr. G. W. Wilson, defendida com o título "Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems" e concluída sob orientação do Dr. D. G. Fredlund e Dr. S. L. Barbour (SOILCOVER, 2000).

Yanful *et al.* (2003), Yanful *et al.* (2006) e Wilson e Fredlund (2000) apresentam trabalhos nos quais foram realizadas modelagens numéricas com a utilização do SoilCover. Estes trabalhos comparam resultados experimentais de campo com as simulações numéricas do programa e verificam que o SoilCover gera resultados aceitáveis.

### 3.6.2 Apresentação do VADOSE/W

O programa VADOSE/W utilizado nesta dissertação está contido no pacote GeoStudio, versão 2007, desenvolvido pela GEO-SLOPE International sediada no Canadá. Esta versão do programa também segue a abordagem teórica apresentada neste capítulo e faz uso das equações simplificadas propostas por Wilson (1990), além de utilizar o Método dos Elementos Finitos, conjugado com o Método das Diferenças Finitas para fazer a integração no tempo.

O desempenho do VADOSE/W em análises numéricas aplicado à sistemas de cobertura é verificado por Ribeiro (2011) que compara os resultados numéricos com os dados obtidos no

campo. O autor afirma há uma boa concordância entre os resultados, tanto com a modelagem uni, quanto com a modelagem bidimensional dos sistemas de cobertura.

### 3.6.3 Parâmetros de entrada dos programas

Os dados de entrada dos programas podem ser divididos nas categorias: detalhes de modelagem, propriedades dos materiais e condições de contorno.

#### Detalhes de modelagem:

- Intervalos de tempo: data inicial e o número de dias para a simulação, além do intervalo de tempo a ser analisado durante cada dia;
- Parâmetros de convergência: número de iterações e a variação máxima permitida entre iterações;
- Geometria da malha.

O VADOSE/W, por padrão, apresenta a malha bidimensional, porém o usuário pode convertê-lo para unidimensional de acordo com o problema. Já o SoilCover apresenta somente malha unidimensional.

#### Propriedades dos materiais:

- Densidade real dos grãos;
- Índice de vazios;
- Coeficiente de permeabilidade saturado;
- Coeficiente de variação volumétrica;
- Curva de retenção de umidade: sucção matricial versus teor de umidade volumétrico.

O VADOSE/W permite que a curva característica seja inserida no programa por quatro maneiras: pelos pontos obtidos em laboratório, pelos parâmetros  $a$ ,  $m$  e  $n$  de Fredlund e Xing (1994) ou de Van Genuchten (1980) ou ainda estimada a partir da curva granulométrica pelo método de Aubertin *et al.* (2003) em que é necessária a entrada dos parâmetros:

- Diâmetro do solo em 10% passante (mm);
- Diâmetro do solo em 60% passante (mm);

- Teor de umidade para o solo saturado ( $m^3/m^3$ );
- Limite de Liquidez (%).

Já o SoilCover permite apenas que sejam inseridos 20 pontos da curva.

- Permeabilidade não saturada versus sucção;

Os programas geram a curva por meio da equação de Fredlund *et al.* (1994), que necessitam dos dados da curva de retenção de umidade e do valor da permeabilidade saturada. O VADOSE/W também gera a curva a partir das equações de Van Genuchten (1980).

- Condutividade térmica versus teor de umidade gravimétrica;

Os programas utilizam o método de Johansen (1975) para obtenção da função da condutividade térmica. No SoilCover é necessário que o usuário especifique a percentagem de quartzo presente no solo. Já o VADOSE/W demanda a condutividade térmica ( $\text{kJ}/(\text{dia.m.}^\circ\text{C})$ ) do mineral para obtenção da função ou apenas a entrada de um valor constante. Os manuais dos programas indicam valores típicos destes parâmetros.

- Calor específico volumétrico versus teor de umidade gravimétrica.

Os programas trabalham com o método De Vries (1963) que requer que o usuário forneça o valor de calor específico do material ( $\text{kJ}/(\text{kg.}^\circ\text{C})$ ) para que o programa gere os dados de calor específico volumétrico versus teor de umidade gravimétrico. O VADOSE/W permite que se entre com um valor constante para o calor específico volumétrico. Os manuais dos dois programas sugerem valores de calor específico para determinados tipos de solo.

#### Condições de contorno:

- Latitude: latitude em graus do local em estudo;
- Parâmetros da vegetação:
  - Período de crescimento da vegetação;
  - Ponto de murcha (kPa);
  - Índice de área foliar (adimensional);
  - Profundidade da raiz (cm).

- Parâmetros climáticos diários:
  - Temperatura do ar máxima e mínima (°C);
  - Umidade relativa do ar máxima e mínima (%);
  - Precipitação (mm/dia);
  - Evaporação potencial (mm/dia) ou Velocidade do vento (km/h) e Radiação solar (MJ/(m<sup>2</sup>.dia).

#### 3.6.4 Parâmetros de saída

A partir dos parâmetros de entrada inseridos pelo usuário, os programas geram inúmeras possibilidades de resultado, porém serão destacadas as três saídas que, se analisadas juntas, permitem a avaliação do comportamento e da eficiência de um sistema de cobertura:

- Percolação de água pela base da cobertura proveniente da precipitação;
- Balanço hídrico: volume acumulado ao longo do tempo da precipitação, evaporação, transpiração, escoamento superficial, percolação e água acumulada no perfil;
- Perfil de saturação: variação do grau de saturação pela profundidade e ao longo do tempo.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta para o presente trabalho consiste na apresentação de um estudo de caso hipotético de fechamento de barragem de rejeito para exemplificar o dimensionamento de um sistema de cobertura com solo e possibilitar discussões sobre os conceitos, as etapas e parâmetros envolvidos no problema. Soma-se a esta metodologia a quantificação e análise da sensibilidade no resultado final dos parâmetros é métodos escolhidos durante o dimensionamento deste sistema de cobertura. Ao final são realizadas simulação para verificação do potencial de utilização de diferentes tipos de rejeitos brasileiros como material de construção em sistemas de cobertura.

### 4.1 Estudo de caso

Este capítulo apresenta um estudo de caso hipotético de fechamento de barragem de rejeito para exemplificar o dimensionamento de um sistema de cobertura com solo e possibilitar discussões sobre os conceitos, as etapas e parâmetros envolvidos no problema.

As premissas consideradas são:

- Rejeito não inerte proveniente do processo de exploração de ouro;
- O local do fechamento é a região metropolitana de Belo Horizonte, cujo clima se caracteriza como Cwa: temperado úmido com inverno seco e verão quente, segundo classificação climática de Koppen-Geiger;
- As dimensões do reservatório formado pela barragem não serão consideradas.

Para o dimensionamento desta cobertura serão atendidas as orientações e as recomendações propostas pelas metodologias propostas por Junqueira *et al.* (2011a), ITRC (2003) e Ribeiro (2011) apresentadas no Capítulo 2.

#### 4.1.1 Planejamento

Nesta etapa inicial, os seguintes aspectos são definidos:

- Objetivos da cobertura: minimizar a infiltração de águas pluviais e do ar para o rejeito não inerte no reservatório da barragem;

- Tipos de coberturas apropriadas ao clima local: sistemas de coberturas convencionais, evapotranspirativas monolíticas e compostas, por apresentarem melhor desempenho em locais onde a pluviometria é superior à evaporação durante a maior parte do ano;
- Infiltração máxima aceitável: será considerada como aceitável a infiltração menor que 3% da precipitação ocorrida no período analisado. Chegou-se a este valor a partir de uma análise dos resultados das análises e de referências de projetos similares;
- Estudo das áreas de empréstimo de materiais para construção da cobertura: disponibilidade de solo orgânico, arenoso, siltiloso e argiloso nas quantidades que se fizerem necessárias;
- Custo máximo aceitável para manter a construção da cobertura viável: como as áreas e os volumes de materiais não serão quantificados, não serão realizados comparativos econômicos.

#### 4.1.2 Ensaio de laboratório

As propriedades geotécnicas dos materiais a serem utilizados na construção e do rejeito foram extraídas de trabalhos anteriores. A TAB. 4.1 consolida os parâmetros dos materiais, a origem da área de empréstimo e a fonte dos resultados.

TABELA 4.1 – Parâmetros geotécnicos, origem dos materiais e fonte de obtenção dos resultados.

<b>Tipo de material</b>	<b>Origem</b>	<b>G</b>	<b>e</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>k<sub>s</sub> (cm/s)</b>	<b>Fonte dos resultados</b>
<b>Orgânico</b>	Paracatu/MG	2,867	0,80	28,1	20,6	8,20 x 10 <sup>-6</sup>	AMORIM (2008)
<b>Argiloso</b>	Belo Horizonte/MG	2,720	0,64	30,0	24,0	1,40 x 10 <sup>-7</sup>	RIBEIRO (2012)
<b>Siltoso</b>	Belo Horizonte/MG	2,779	1,17	54,7	36,8	1,20 x 10 <sup>-5</sup>	LOPES (2006)
<b>Arenoso</b>	-	2,650	0,65	NP	NP	1,00 x 10 <sup>-4</sup>	PINTO (2006)
<b>Rejeito</b>	Paracatu/MG	2,822	0,91	38,0	21,1	5,30 x 10 <sup>-5</sup>	RIBEIRO (2011)

O GRAF. 4.1 apresenta as curvas granulométricas dos materiais disponíveis para construção do sistema de cobertura.

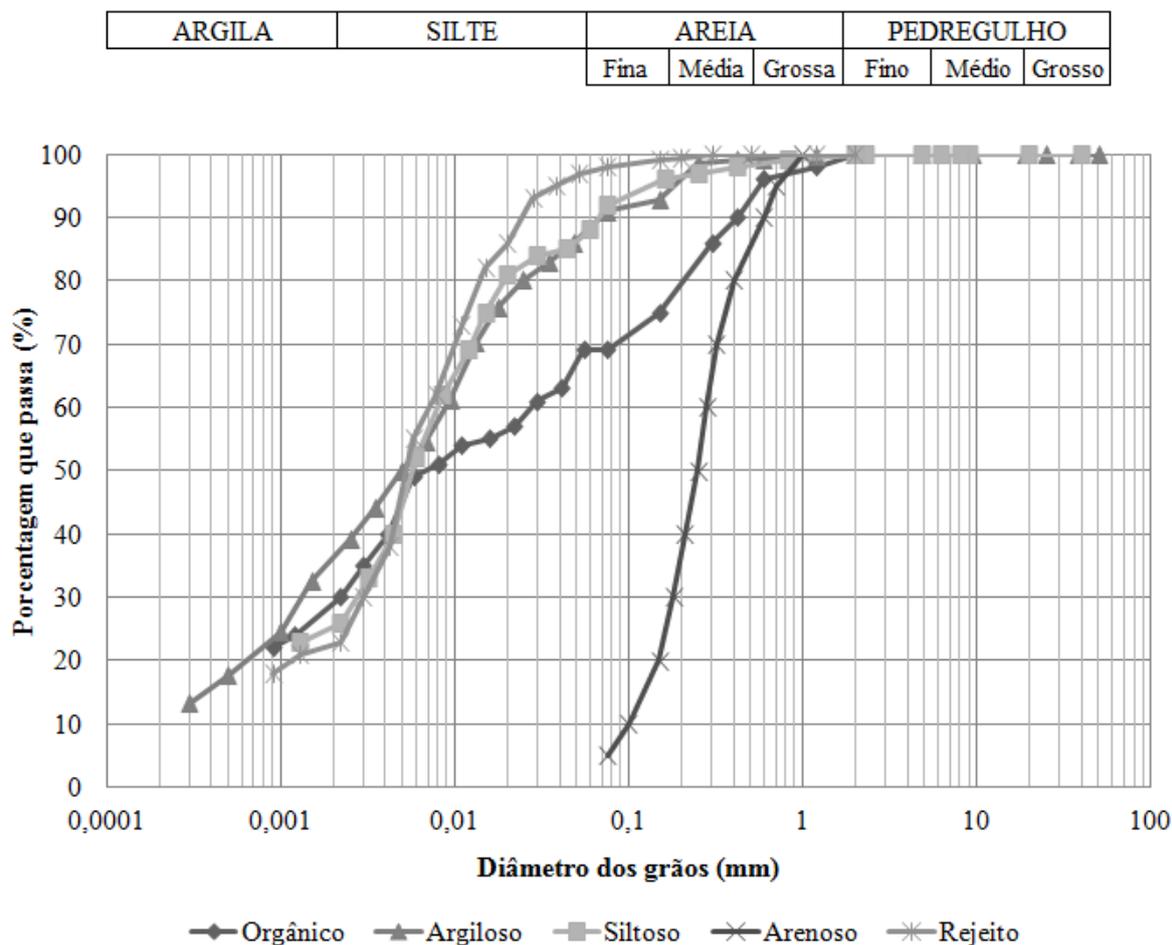


GRÁFICO 4.1 – Curvas granulométricas dos solos orgânico, argiloso, siltoso, arenoso e do rejeito.

O valor do coeficiente de variação volumétrica  $M_v$  foi indicado pelo manual do VADOSE/W como  $1,00 \times 10^{-5}$  1/kPa para todos os materiais. A influência da utilização deste valor indicado em relação aos valores obtidos em ensaios laboratoriais será avaliada e discutida no Capítulo 5.

Os GRAF. 4.2 a 4.6 apresentam as curvas de retenção de umidade dos materiais disponíveis para construção do sistema de cobertura. Amorim (2008), Lopes (2006) e Ribeiro (2011) apresentam os parâmetros da curva a partir do método de ajuste proposto por Fredlund e Xing (1994). Para o solo argiloso apresentado por Ribeiro (2012), optou-se pelo método de Van Genuchten (1980) por apresentar melhor ajuste do que o proposto pelo método de Fredlund e Xing (1994). A curva do solo arenoso foi escolhida a partir da curva típica proposta por Fredlund e Xing (1994) para este tipo de material.

Os parâmetros de ajustes do rejeito apresentados por Ribeiro (2011) a partir do método de Fredlund e Xing (1994) não puderam ser utilizados nas simulações numéricas com auxílio do VADOSE/W visto que o maior valor permitido pelo programa para o parâmetro “a” é 1.000.000 e o valor correto é 7.660.000. Portanto, foi criada uma planilha para gerar a curva de retenção de umidade a partir dos parâmetros reais e os pontos desta curva foram inseridos no programa. Verificou-se uma diferença significativa entre as curvas de retenção de umidade obtidas a partir dos diferentes valores do parâmetro “a”.

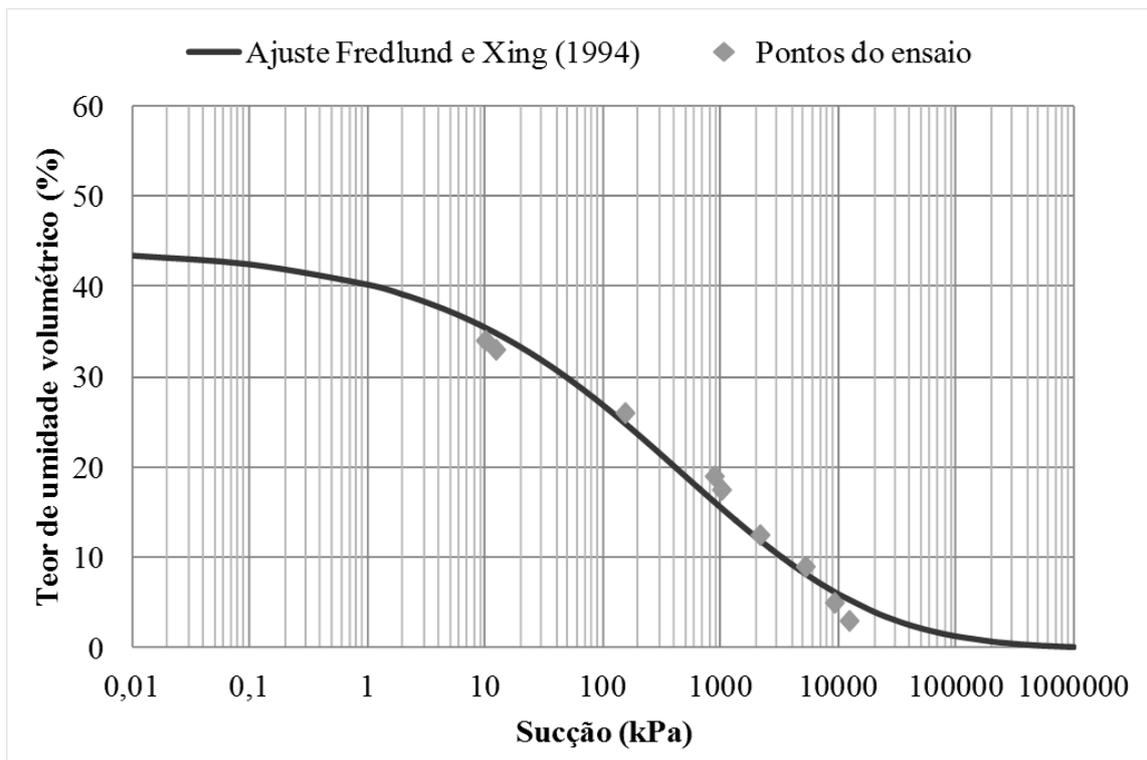


GRÁFICO 4.2 – Curva de retenção de umidade do solo orgânico ajustada pelo método de Fredlund e Xing (1994).  
FONTE - AMORIM, 2008.

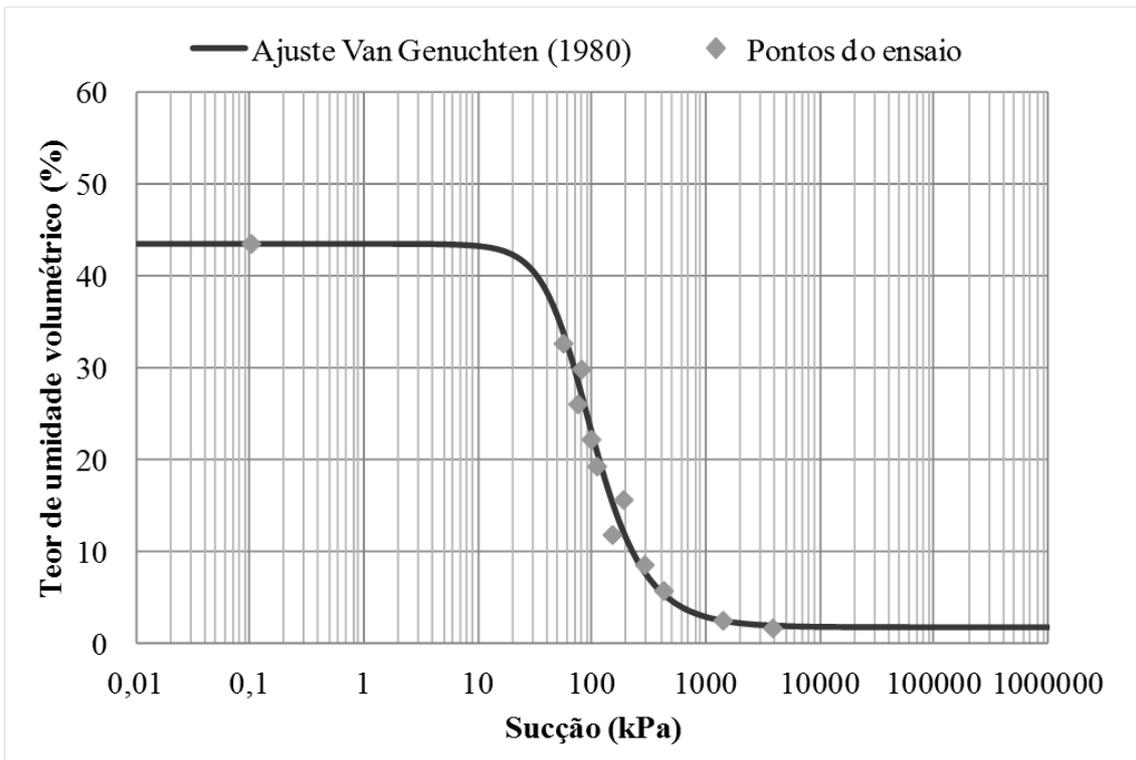


GRÁFICO 4.3 – Curva de retenção de umidade do solo argiloso ajustada pelo método de Van Genuchten (1980).  
 FONTE - RIBEIRO, 2012.

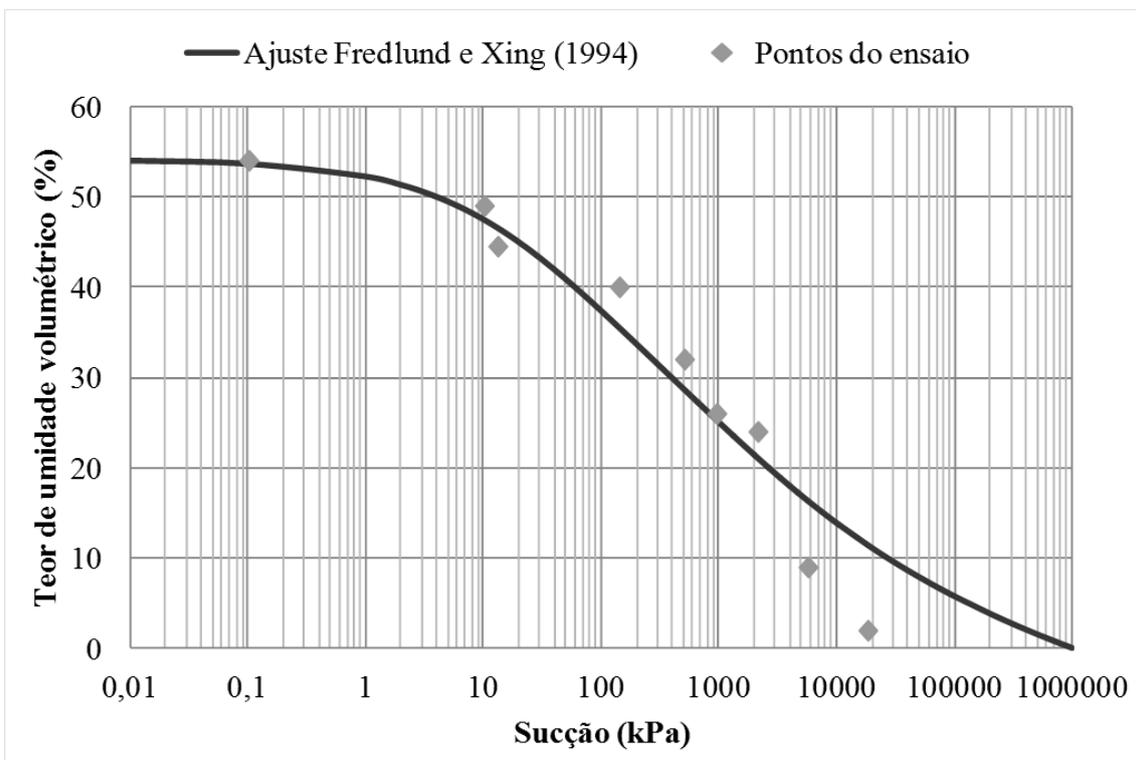


GRÁFICO 4.4 – Curva de retenção de umidade do solo siltoso ajustada pelo método de Fredlund e Xing (1994).  
 FONTE - LOPES, 2006.

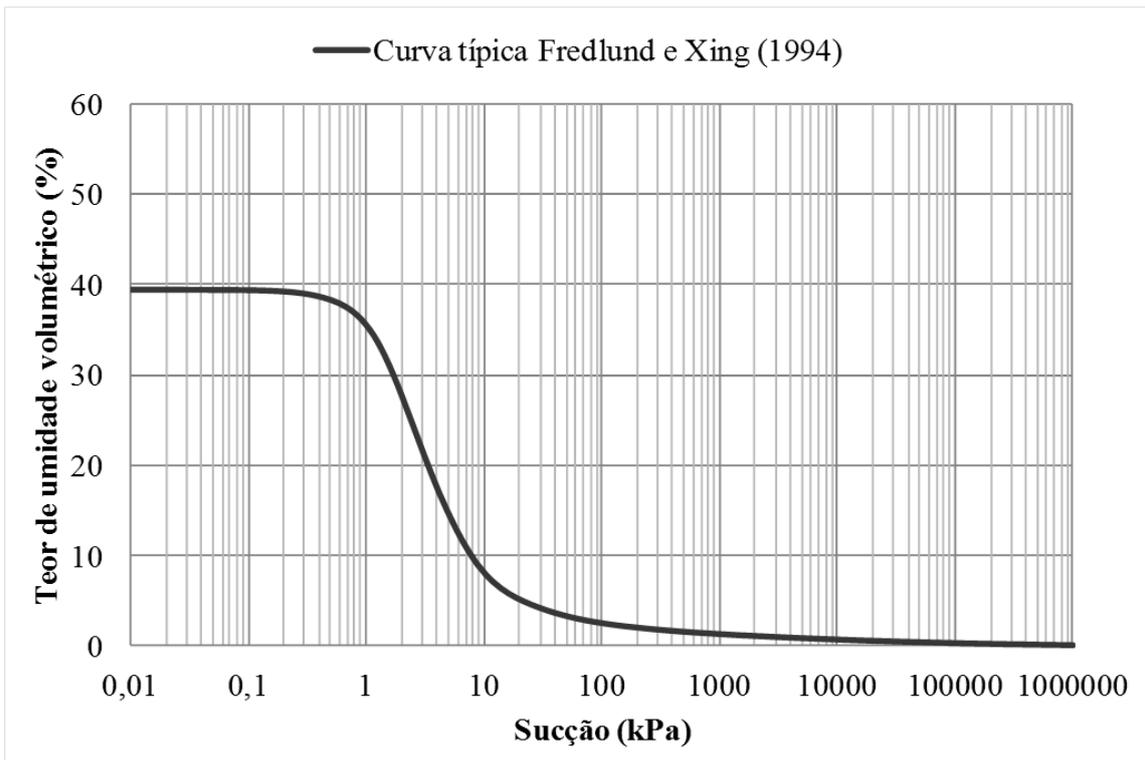


GRÁFICO 4.5 – Curva típica de retenção de umidade do solo arenoso proposta por Fredlund e Xing (1994).  
 FONTE - VADOSE/W.

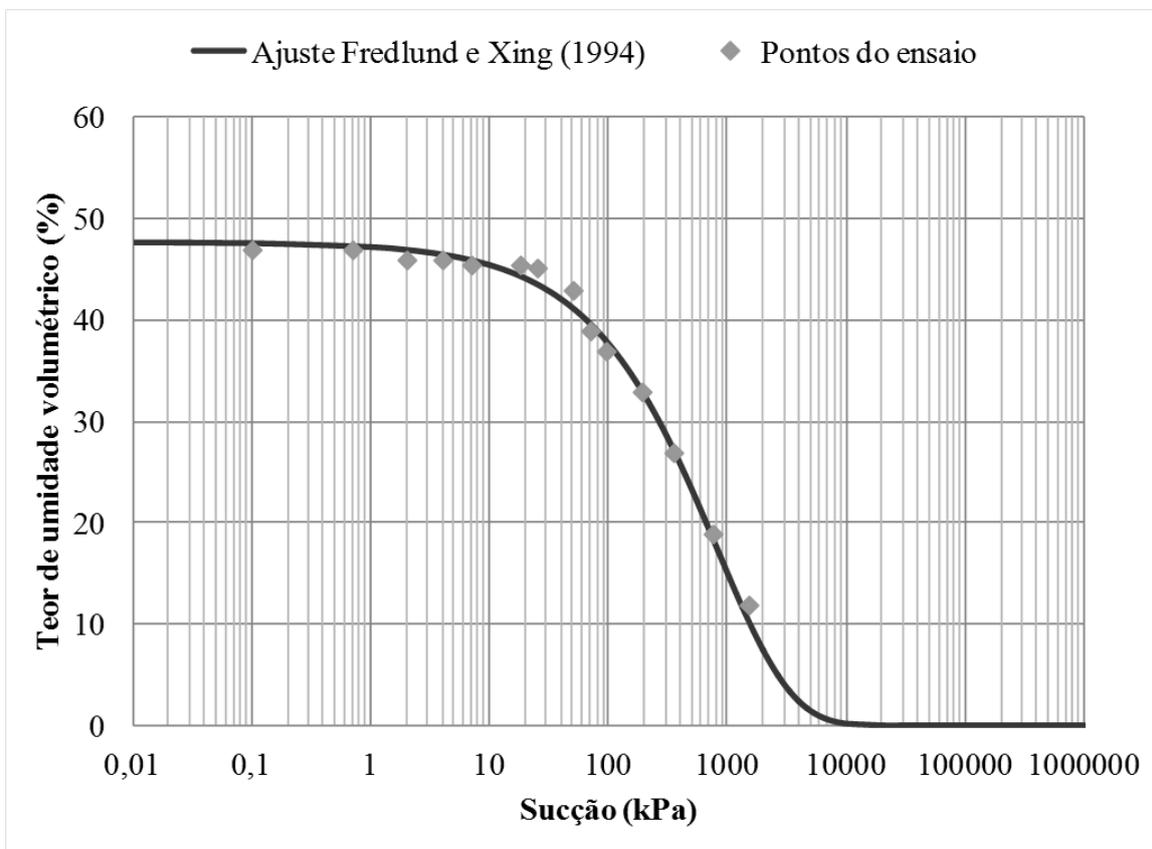


GRÁFICO 4.6 – Curva de retenção de umidade do rejeito ajustada pelo método de Fredlund e Xing (1994).  
 FONTE - RIBEIRO, 2011.

A metodologia escolhida para cálculo da permeabilidade não saturada para todos os materiais a partir da curva de retenção de umidade foi a de Fredlund *et al.* (1994). O GRAF. 4.7 apresenta as curvas permeabilidade não saturada estimadas pelo programa.

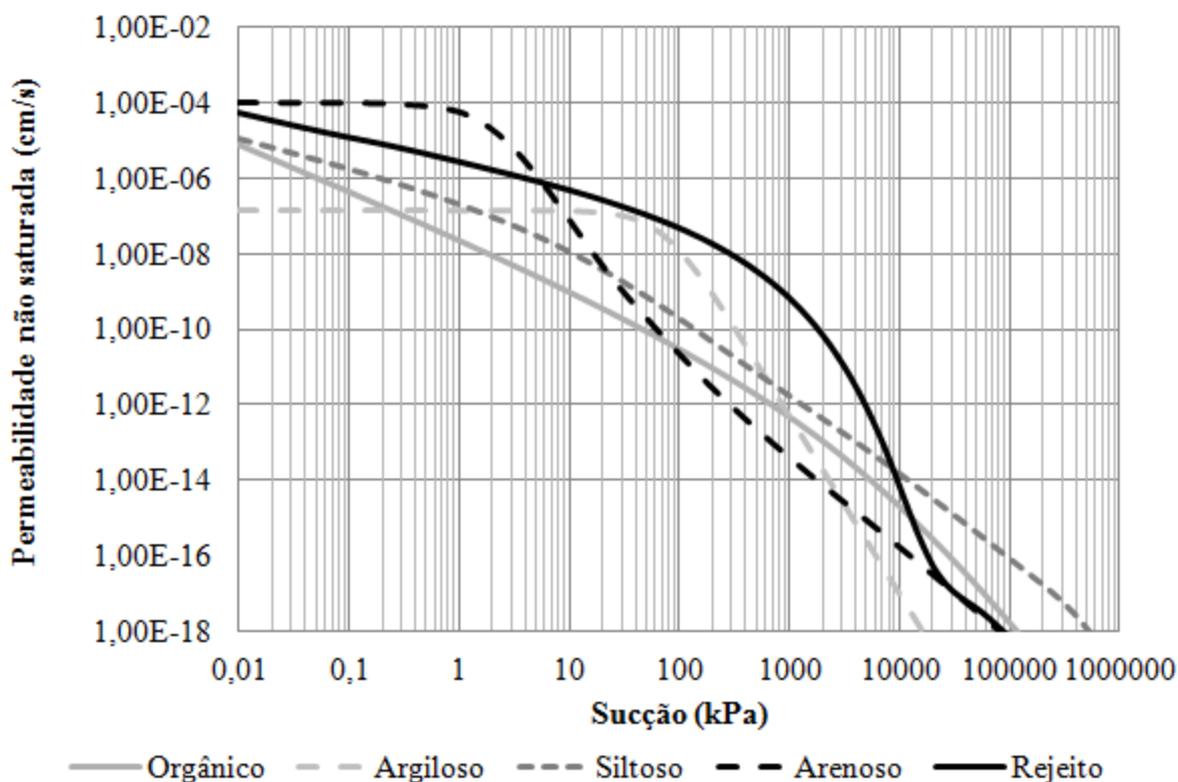


GRÁFICO 4.7 – Curvas de permeabilidade não saturada dos solos orgânico, argiloso, siltoso, arenoso e do rejeito obtidas pelo método de Fredlund *et al.* (1994).

#### 4.1.3 Modelagem e projeto

O programa VADOSE/W foi escolhido para realizar as análises numéricas desta etapa.

##### 4.1.3.1 Tempo da análise

A simulação considerou a data inicial da análise em 1 de outubro de 2012 para que se coincida com o ano hidrológico que será apresentado em seguida e a data final em 30 de setembro de 2015. O período mínimo de 3 anos é adotado para que se estabeleça um equilíbrio com relação às condições iniciais (pós-construção da cobertura).

#### 4.1.3.2 Parâmetros climáticos

Foi estabelecido um ano hidrológico típico com valores diários a partir da análise dos dados reais medidos de hora em hora entre os anos 2003 e 2009 pela torre meteorológica localizada na Planta Industrial do Queiroz, no município de Nova Lima/MG, de propriedade da AngloGold Ashanti Mineração Ltda. O ano hidrológico aplicado à região em análise se inicia em 1 de outubro e termina em 30 de setembro do ano seguinte, visando coincidir com a mudança do período seco para o período chuvoso.

Para cada ano do período analisado os dados climáticos típicos foram duplicados. Ao se manter os mesmos dados climáticos, a análise não sofre influência da variação anual destes dados. Os parâmetros climáticos utilizados como condições de contorno da superfície do sistema de cobertura são: temperatura do ar máxima e mínima, umidade relativa do ar máxima e mínima, velocidade do vento, precipitação e radiação solar. Os GRAF. 4.8 a 4.12 apresentam os valores diários utilizados na análise numérica.

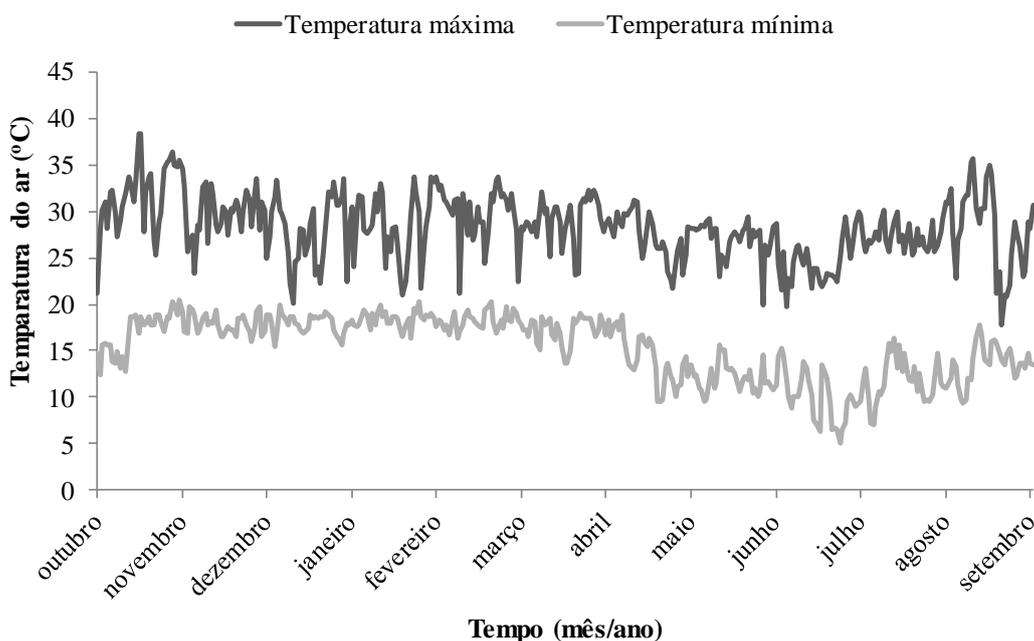


GRÁFICO 4.8 – Temperatura do ar (Estação meteorológica AngloGold).

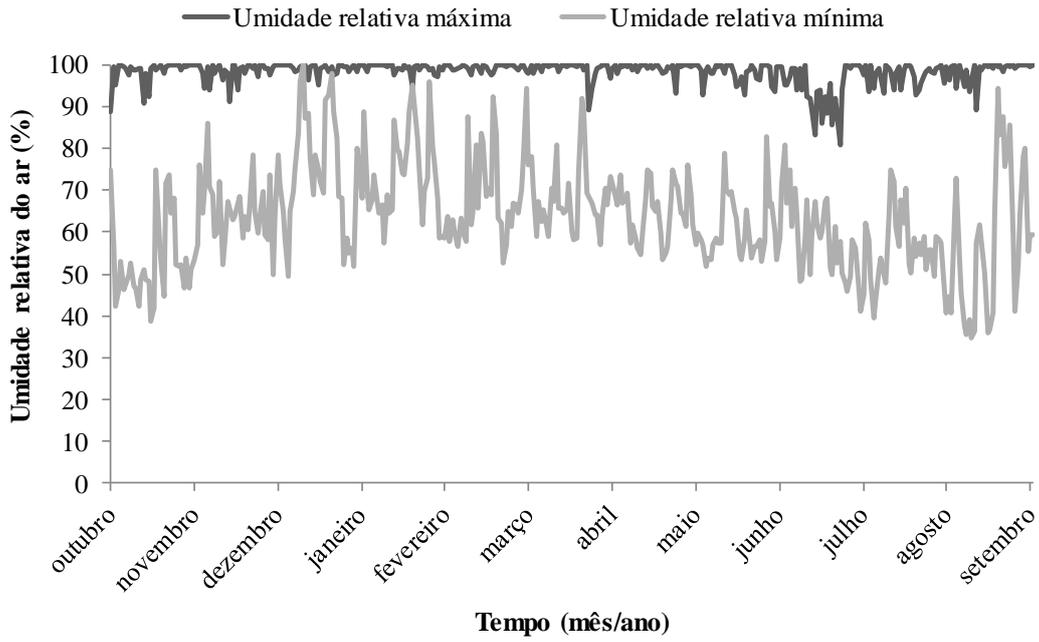


GRÁFICO 4.9 – Umidade relativa do ar (Estação meteorológica AngloGold).

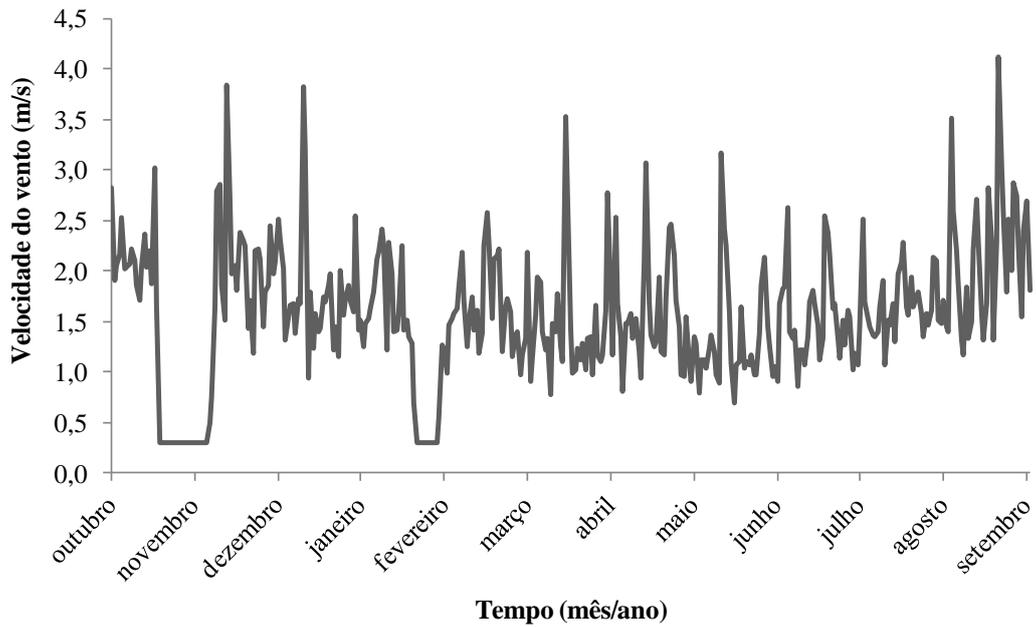


GRÁFICO 4.10 – Velocidade do vento (Estação meteorológica AngloGold).

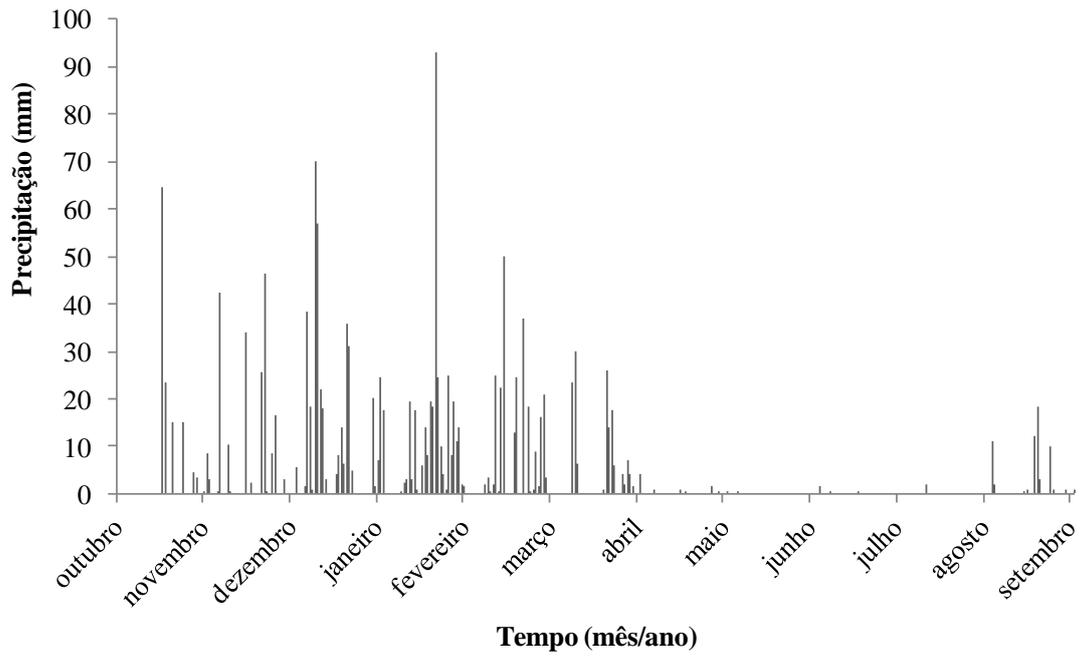


GRÁFICO 4.11 – Precipitação (Estação meteorológica AngloGold).

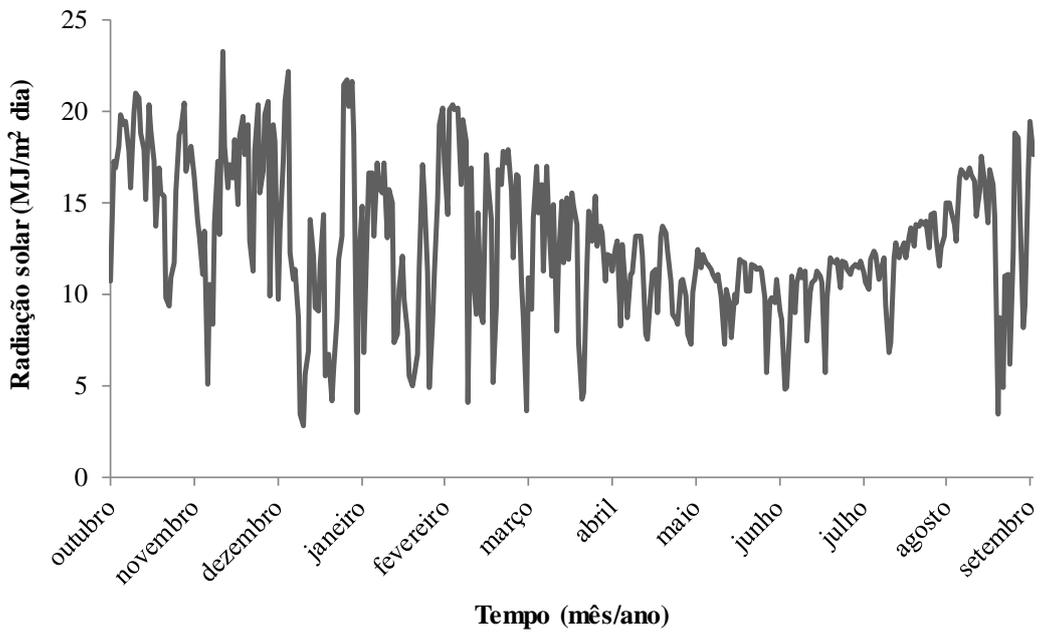


GRÁFICO 4.12 – Radiação solar (Estação meteorológica AngloGold).

#### 4.1.3.3 Geometrias

A partir dos tipos de materiais disponibilizados para construção e dos tipos de sistemas apropriados para o clima tropical com período seco, são propostas 16 combinações de geometrias (TAB. 4.2) formando diferentes sistemas de coberturas.

Além de um sistema convencional e dois evapotranspirativos, foram propostas alternativas para o sistema apresentado por Ribeiro (2011). Mesmo que o sistema de cobertura evapotranspirativa com barreira capilar não seja adequado ao clima do local da análise, optou-se por incorporá-la a análise para que esta possa ser comparada com as demais alternativas. A análise da infiltração no rejeito sem nenhum sistema de cobertura também foi realizada para servir como referência de eficiência das alternativas. Após a realização das análises numéricas, deve-se escolher a alternativa que melhor atenda os requisitos pré-estabelecidos.

TABELA 4.2 – Geometrias analisadas

Tipo de cobertura		Geometria proposta					
Sistema	Camadas	Alt.	Espessura da camada (m)				
			Orgânico	Siltoso	Argiloso	Arenoso	Total
Sem cobertura		-	-	-	-	-	-
Sistema convencional	Barreira hidráulica	1	0,2	-	0,5	-	<b>0,7</b>
		2	0,2	-	1,0	-	<b>1,2</b>
		3	0,2	-	2,0	-	<b>2,2</b>
		4	0,2	-	4,0	-	<b>4,2</b>
Sistema evapotranspirativo	Monolítica	1	0,2	0,5	-	-	<b>0,7</b>
		2	0,2	1,0	-	-	<b>1,2</b>
		3	0,2	2,0	-	-	<b>2,2</b>
		4	0,2	4,0	-	-	<b>4,2</b>
	Barreira capilar	1	0,2	0,5	-	0,4	<b>1,1</b>
		2	0,2	1,0	-	0,4	<b>1,6</b>
		3	0,2	2,0	-	0,4	<b>2,6</b>
		4	0,2	4,0	-	0,4	<b>4,6</b>
Sistema proposto por Ribeiro (2011)	Armazenamento-e-liberação e barreira hidráulica	1	0,2	0,5	0,5	-	<b>1,2</b>
		2	0,2	1,0	0,5	-	<b>1,7</b>
		3	0,2	2,0	0,5	-	<b>2,7</b>
		4	0,2	4,0	0,5	-	<b>4,7</b>

#### 4.1.3.4 Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos foi definida de forma a proporcionar análise unidimensional da cobertura. Tipicamente, usa-se malha menor que 1 cm no topo, com um espaçamento maior em profundidade. O espaçamento máximo entre as malhas utilizado nesta dissertação foi de 20 cm, pois foi considerado um valor que equilibra a precisão no resultado com o menor tempo para resolução das análises numéricas pelo programa. A influência deste valor no resultado foi analisada neste trabalho.

Parâmetros climáticos e de vegetação foram estabelecidos como condições de contorno no topo da cobertura e o nível d'água foi posicionado na base do rejeito, admitido 3 m abaixo da base da cobertura. A FIG. 4.1 exemplifica a definição da malha para uma das alternativas do sistema evapotranspirativo com barreira capilar.

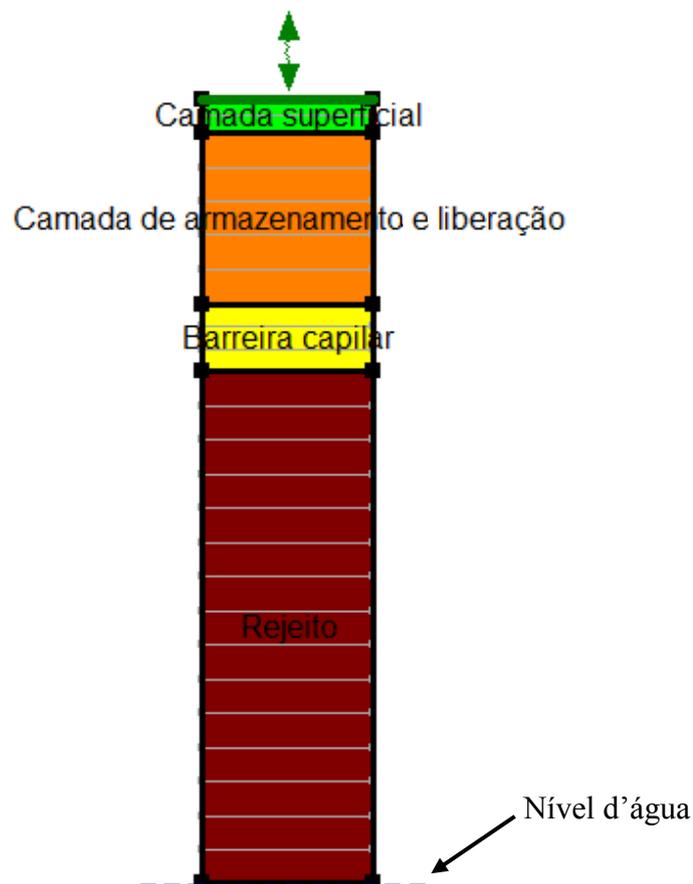


FIGURA 4.1 – Exemplo de malha de elemento finitos.

#### 4.1.3.5 Parâmetros de vegetação

Como a escolha do tipo de vegetação da cobertura deve considerar as espécies nativas, previram-se gramíneas com maior crescimento durante as estações chuvosas, com raízes distribuídas de forma triangular e de profundidade máxima de 40 cm. A escolha destes parâmetros se fez a partir de valores médios típicos da região e considerando a capacidade de desenvolvimento da espécie nas camadas em que ela alcança. Porém, para comprovação da capacidade de desenvolvimento da espécie vegetal nos materiais abaixo da camada orgânica superficial, é necessário realizar testes de campo que não foram realizados neste trabalho. Não foram consideradas as alterações que a presença das raízes das espécies vegetais pode causar nas propriedades dos materiais que ela atinge como, por exemplo, a aumentar a permeabilidade de água.

Os parâmetros da vegetação foram estimados a partir da premissa que considera a inexistência de vegetação nem raízes até 01/04/2013 (180 dias após o término da construção) e, a partir desta data, crescimento gradual até 01/08/2013 (300 dias após o término da construção) quando as raízes atingem a profundidade total. Os GRAF. 4.13 a 4.14 apresentam os parâmetros de vegetação utilizados como entrada nos programas.

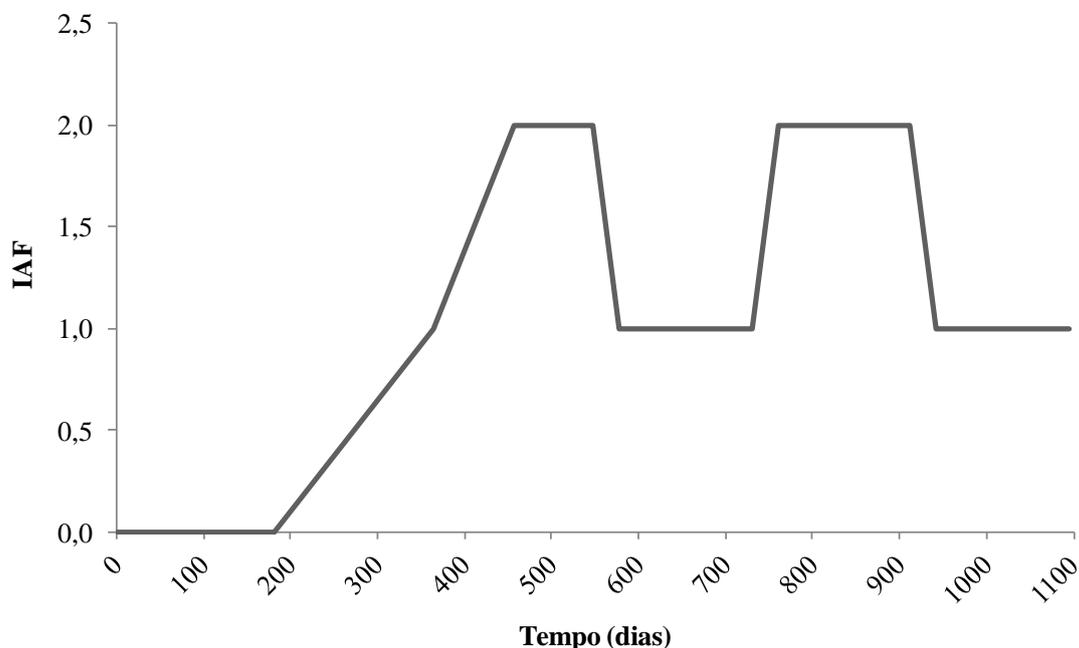


GRÁFICO 4.13 – Variação do IAF ao longo do período da análise.

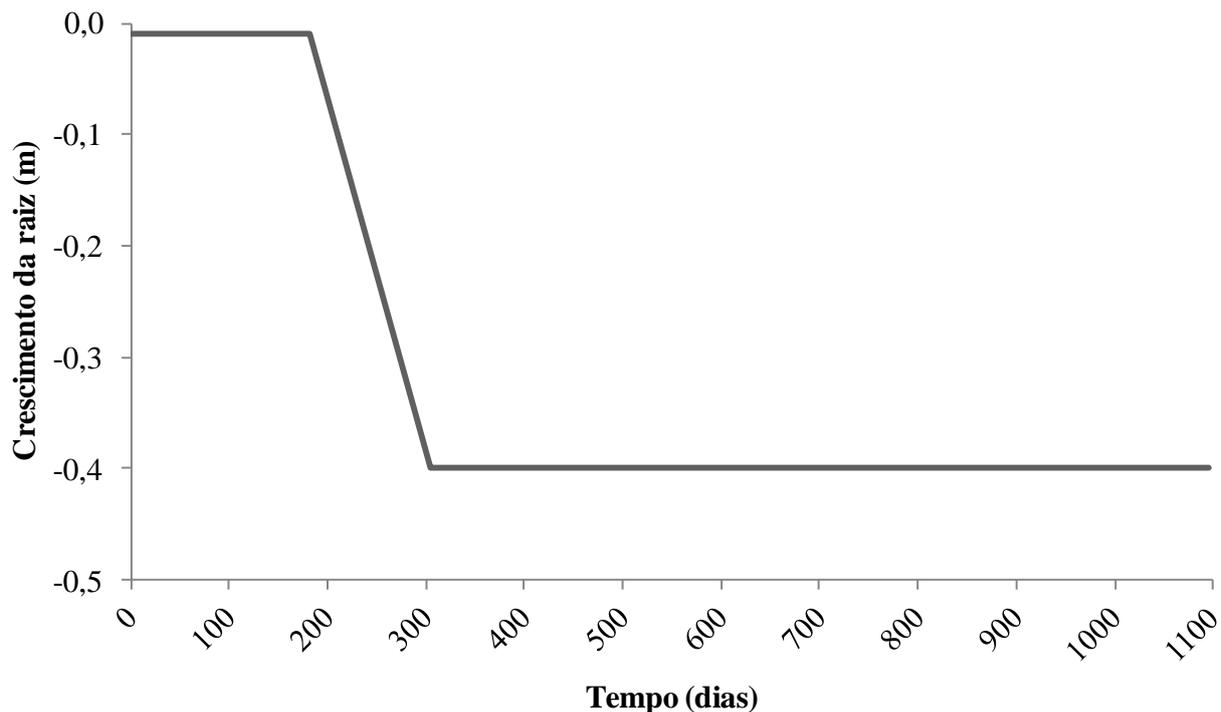


GRÁFICO 4.14 – Crescimento da raiz ao longo do período da análise.

A sucção correspondente à umidade volumétrica em que a planta começa a ter dificuldade em extrair água do solo foi adotada como 100 kPa e a máxima capacidade de extração de água do solo pelas plantas como 1500 kPa, conforme sugere o manual do programa VADOSE/W (GEO-STUDIO, 2008).

#### 4.1.4 Parâmetros térmicos

A condutividade térmica do solo foi estimada constante e igual a 280 kJ/(dia.m.°C) e o calor específico volumétrico do solo foi estimado constante e igual a 2750 kJ/(m<sup>3</sup>.°C), de acordo com o recomendado por GEO-STUDIO (2008). A variação destes valores para verificação da sua influência nos resultados também foi realizada mais adiante nesta dissertação.

#### 4.1.5 Uso de células teste em escala de campo

O uso de células teste em escala de campo para o estudo de caso proposto não é realizado neste trabalho, portanto os resultados não contam com a calibração do modelo baseada em resultados de monitoramento de campo.

## 4.2 Análises de sensibilidade nos resultados

Os parâmetros de entrada para o dimensionamento do sistema de cobertura realizado no estudo de caso foram obtidos pelos meios de:

- Ensaio laboratoriais;
- Estação meteorológica;
- Dados da literatura;
- Escolha arbitrária baseada na experiência.

Os dados obtidos por ensaios laboratoriais (como os parâmetros geotécnicos dos materiais de construção) e os obtidos pela estação meteorológica, sendo de fontes consideradas confiáveis não geram desvios no processo de dimensionamento na maioria dos casos, porém estão sujeitos à variabilidade.

Os dados que dependem da definição de um método para obtenção (como a curva de retenção de umidade), que são obtidos na literatura (como os parâmetros térmicos) ou que são definidos pela escolha arbitrária (como os parâmetros da vegetação), mesmo que baseada em experiências anteriores, podem ser potenciais geradores de desvio do resultado final desejado. Este potencial desvio é agravado, visto que, além de se estimar a magnitude destes parâmetros, estima-se ainda a sua variação em função do tempo.

### 4.2.1 Objetivo

Esta análise tem como objetivo quantificar e analisar criticamente a sensibilidade nos resultados finais das definições tomadas durante o dimensionamento de um sistema de cobertura.

### 4.2.2 Metodologia adotada

Para cumprir o objetivo proposto, variaram-se os potenciais geradores de desvio do resultado final desejado como o período da análise, os métodos de obtenção de alguns dados e os parâmetros definidos a partir da literatura e da escolha arbitrária. A alternativa 3 do sistema proposto por Ribeiro (2011) foi escolhida como referência para os valores que serão alterados. Optou-se por esta alternativa visto que os resultados das análises numéricas para cada geometria (TAB 5.1) indicam saturação completa do rejeito para a menor espessura, à não variação do grau de

saturação do rejeito para maior espessura. Esta variação dos resultados permite melhor análise de sensibilidade.

Nesta análise será avaliada apenas a variação da infiltração de água que percola pela base do sistema de cobertura e atinge o rejeito. Ao final, os dados climáticos foram alterados e subsidiaram novo dimensionamento para obtenção da nova melhor alternativa e foi realizada uma comparação destes resultados com a melhor alternativa do estudo de caso realizado.

#### 4.2.2.1 Alteração no período da análise

Objetivou avaliar a variação do resultado ao se alterar o período da análise. Para efeito de comparação, a análise é realizada durante 5 anos após a construção do sistema de cobertura.

#### 4.2.2.2 Alteração dos métodos de obtenção ou de tratamento dos parâmetros

##### a) Parâmetros climáticos

- Objetivou avaliar a variação do resultado ao se alterar todos os parâmetros climáticos diários em médias diárias, a partir de dados mensais. Esta análise pretende verificar o que acontece quando os únicos dados climáticos disponíveis são mensais;
- Objetivou avaliar a variação do resultado ao se alterar apenas a pluviometria como dado diário e os demais parâmetros climáticos diários em médias diárias, a partir de dados mensais. Esta análise pretende verificar o que acontece quando o único dado climático diário disponível é a pluviometria e os demais são mensais;
- Objetivou avaliar a variação do resultado ao se utilizar a radiação solar calculada pelo VADOSE/W ao invés dos dados medidos em campo. O GRAF. 4.15 apresenta gráfico comparativo da radiação solar medida em campo com a radiação solar calculada pelo programa. Verifica-se que a curva dos valores medidos em campo é superior à curva dos valores calculados pelo programa;

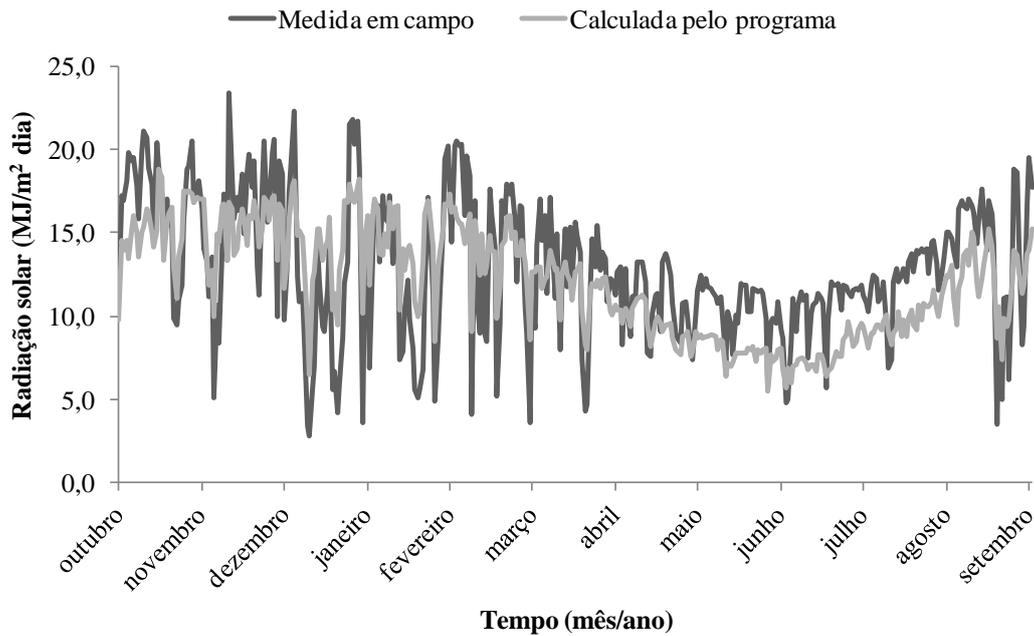


GRÁFICO 4.15 – Comparação radiação solar medida em campo e calculada pelo programa.

b) Parâmetros geotécnicos

- Objetivou avaliar a variação do resultado ao se utilizar valores de coeficiente de variação volumétrica para obtenção da curva de retenção de umidade a partir de ensaios de adensamento. O coeficiente de variação volumétrica ( $M_v$ ) é a inclinação da função do teor de umidade volumétrico quando a poropressão é positiva conforme apresentado no GRAF. 4.16.

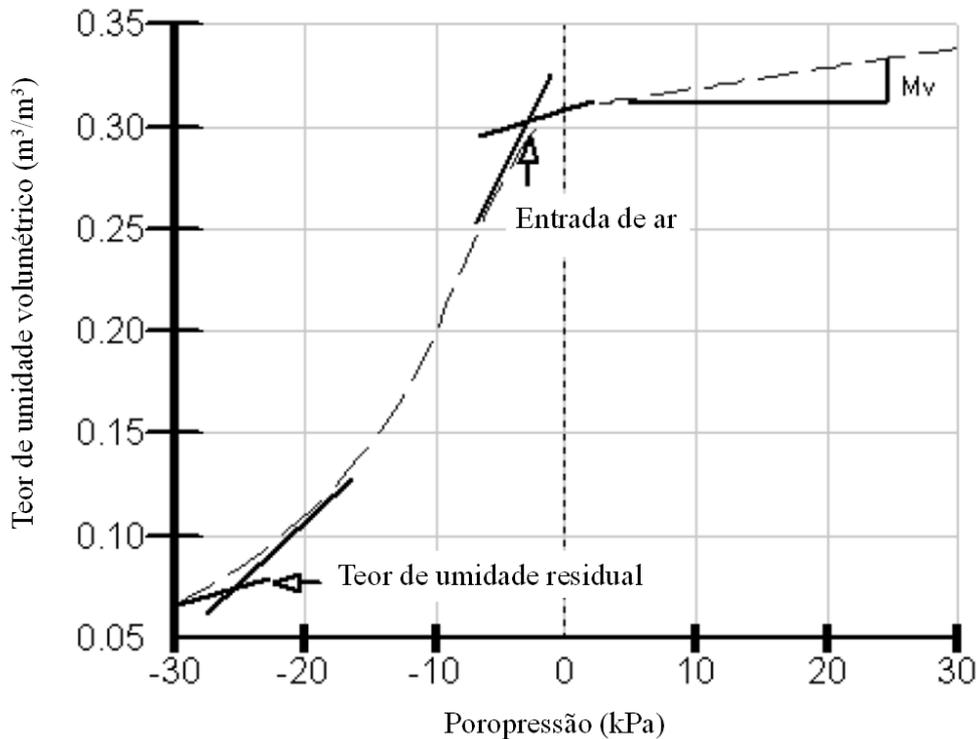


GRÁFICO 4.16 – Função do teor de umidade volumétrico.  
 FONTE - GEO-STUDIO, 2008.

Em termos físicos, o coeficiente de variação volumétrica é obtido pela EQ. 4.1 e descreve a variação adensamento para o solo em condições saturadas. Como a maioria dos problemas relacionados à sistema de cobertura tratam de solos não saturados, o manual do VADOSE/W sugere um baixo valor de  $M_v$ , igual a  $1,00 \times 10^{-5}$  1/kPa.

$$M_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (4.1)$$

Em que:

$a_v$  = coeficiente de compressibilidade;

$e_0$  = índice de vazios inicial.

Dos materiais utilizados nesta simulação, o único que representou resultados de ensaios de adensamento e conseqüentemente permitiu o cálculo de  $M_v$  foi a argila cujos ensaios foram realizados por Ribeiro (2012). O valor de  $M_v$  da argila obtido pelo ensaio foi igual a  $3,00 \times 10^{-4}$  1/kPa. O GRAF. 4.17 compara as curvas de sucção obtidas com valores de  $M_v$  indicado pelo

programa ( $1,00 \times 10^{-5} \text{ 1/kPa}$ ) com valores obtidos pelo ensaio e mostra que as curvas são muito próximas.

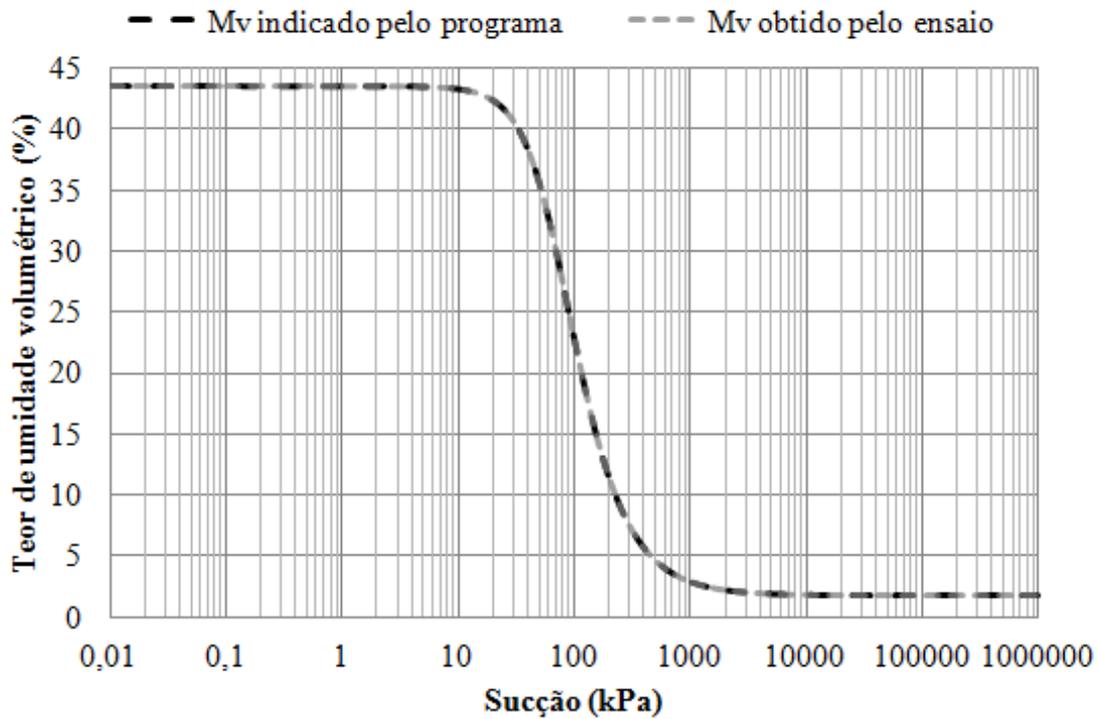


GRÁFICO 4.17 – Comparação da curva de retenção de umidade da argila para  $M_v$  indicado pelo VADOSE/W e pelo valor obtido pelo ensaio.

- Objetivou avaliar a variação do resultado ao se obter a curva de retenção de umidade a partir da curva granulométrica pelo método apresentado por Aubertin *et al.* (2003). Os GRAF. 4.18 a 4.21 apresentam as curvas obtidas por este método comparadas com as curvas obtidas anteriormente apresentadas;

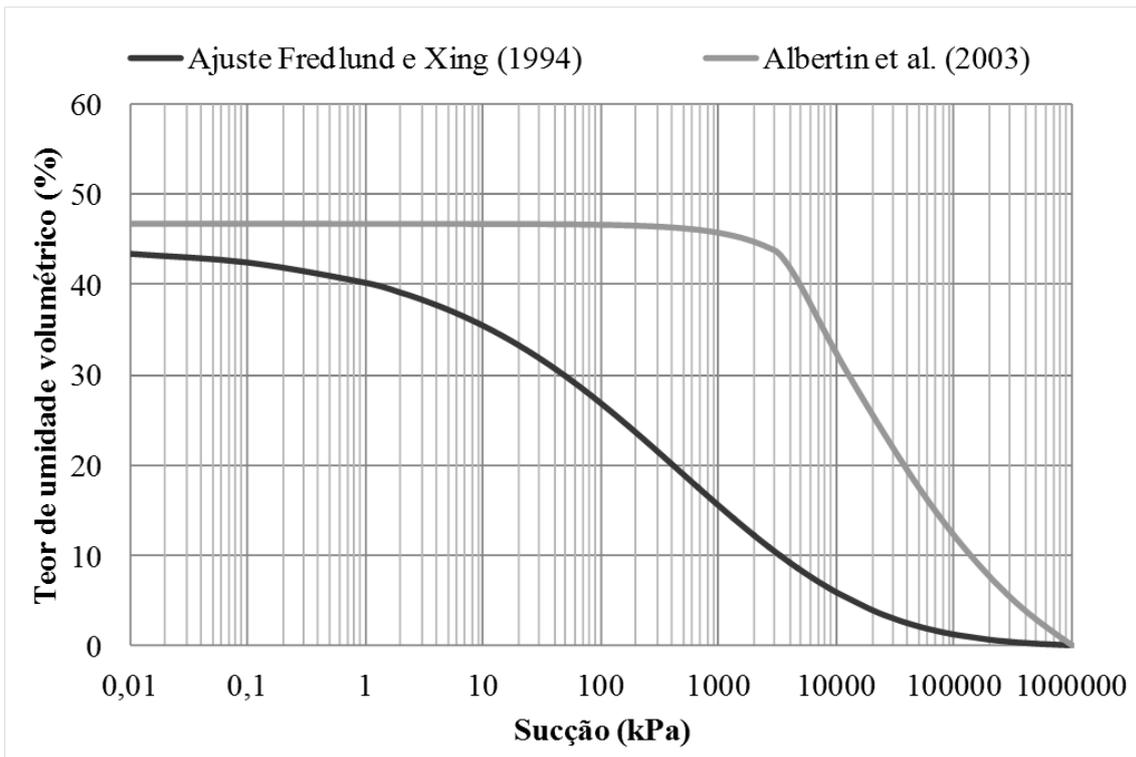


GRÁFICO 4.18 – Comparação das curvas de retenção de umidade do solo orgânico obtidas pelos modelos Aubertin *et al.* (2003) e ajustada por Fredlund *et al.* (1994).

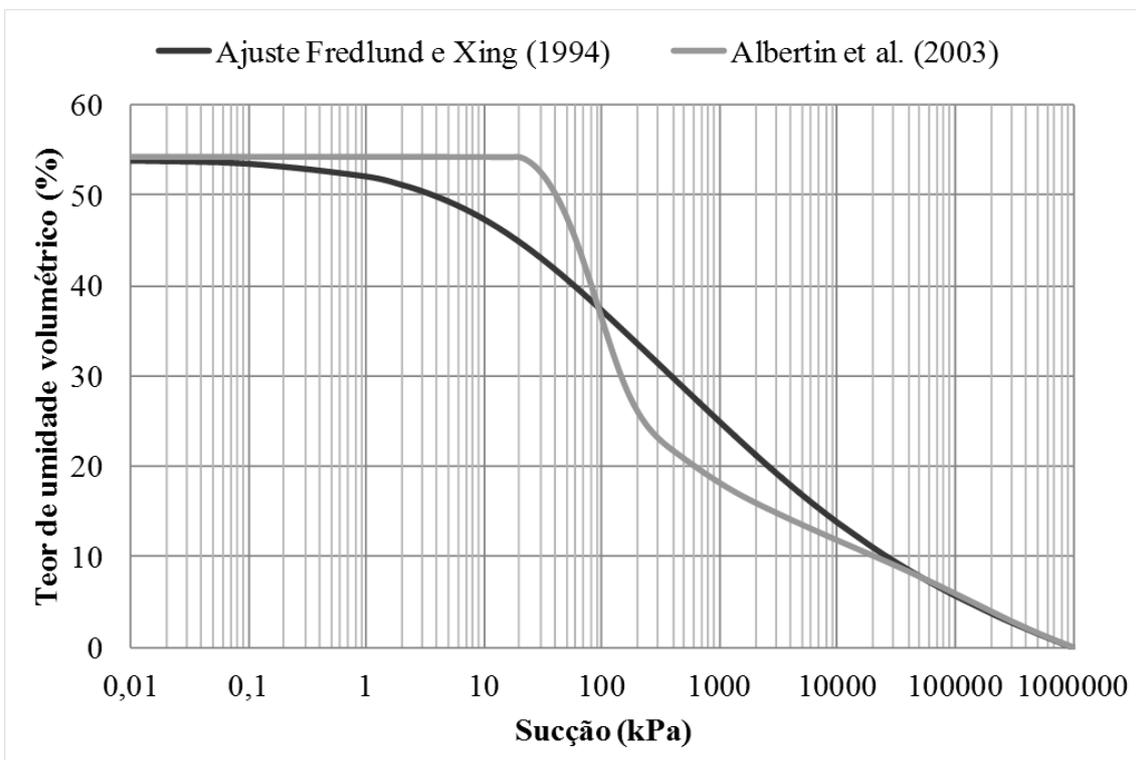


GRÁFICO 4.19 – Comparação das curvas de retenção de umidade do solo siltoso obtidas pelos modelos Aubertin *et al.* (2003) e ajustada por Fredlund *et al.* (1994).

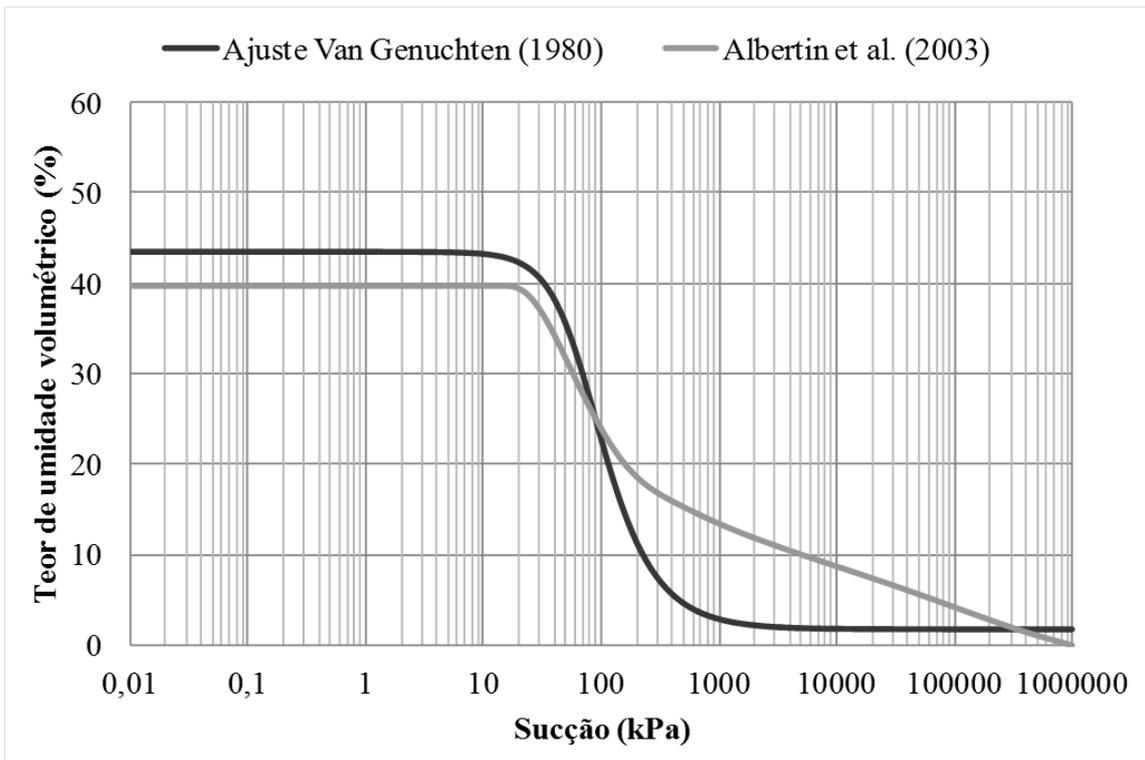


GRÁFICO 4.20 – Comparação das curvas de retenção de umidade do solo argiloso obtidas pelos modelos Aubertin *et al.* (2003) e ajustada por Van Genuchten (1980).

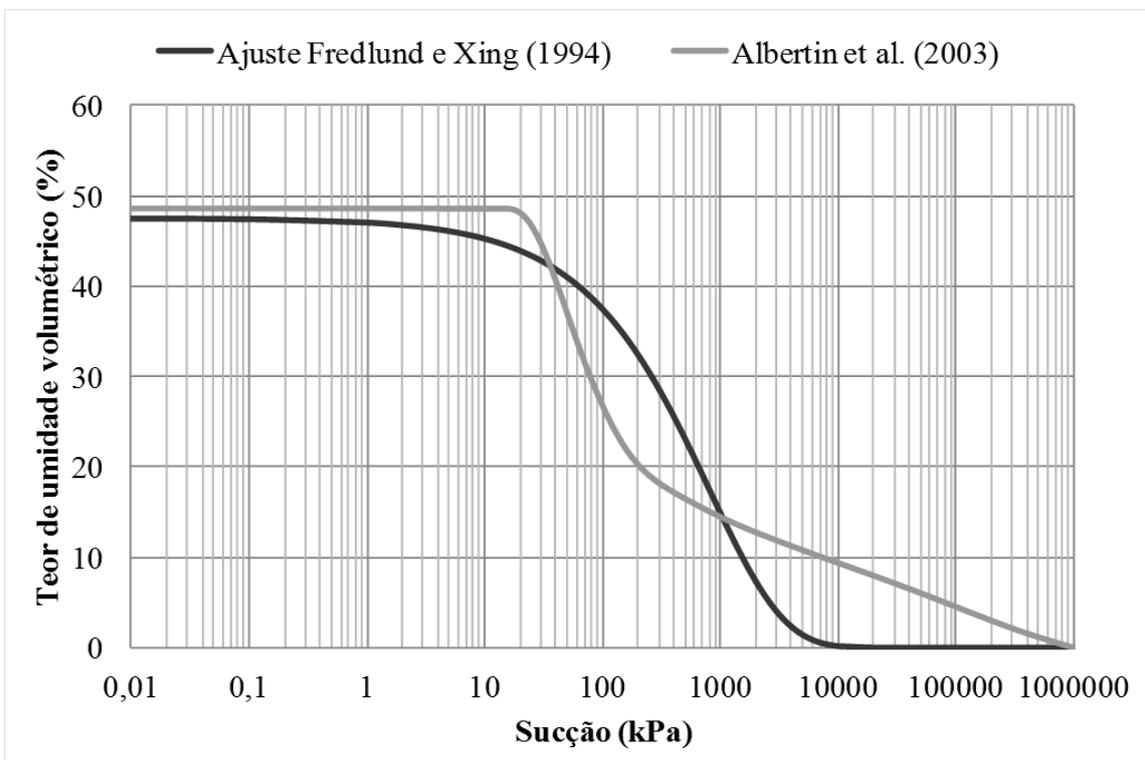


GRÁFICO 4.21 – Comparação das curvas de retenção de umidade do rejeito obtidas pelos modelos Aubertin *et al.* (2003) e ajustada por Fredlund *et al.* (1994).

- Objetivou avaliar a variação do resultado ao se estimar a permeabilidade não saturada pelo método de Van Genuchten (1980). Os GRAF. 4.22 a 4.25 apresentam as curvas obtidas por este método comparadas com as curvas obtidas pelo método de Fredlund *et al.* (1994) anteriormente considerado.

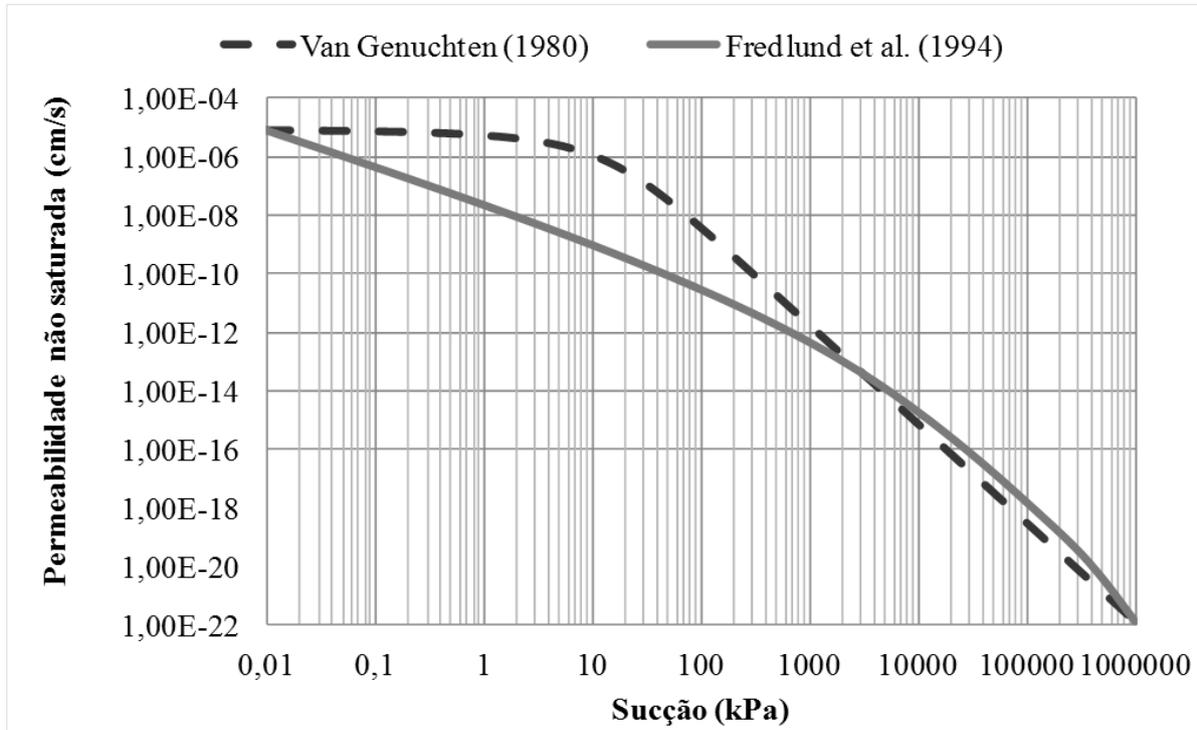


GRÁFICO 4.22 – Comparação das curvas de permeabilidade não saturada do solo orgânico obtidas pelos modelos de Fredlund *et al.* (1994) e Van Genuchten (1980).

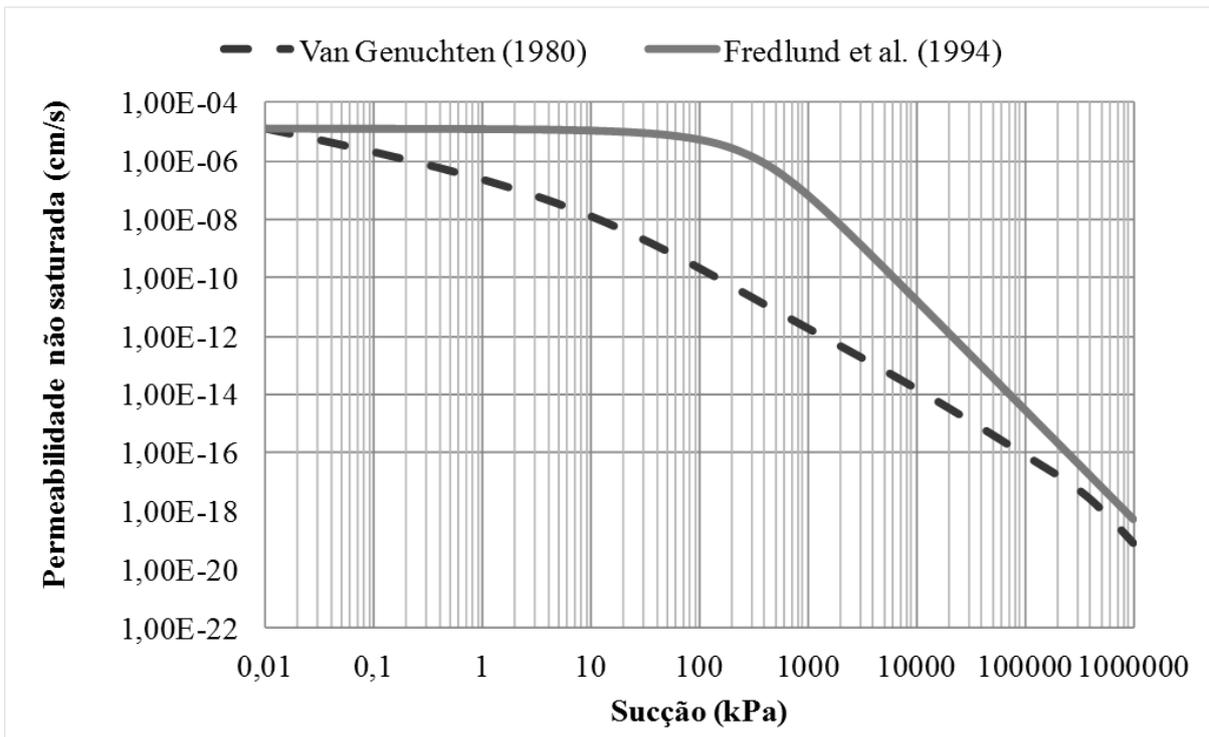


GRÁFICO 4.23 – Comparação das curvas de permeabilidade não saturada do solo siltoso obtidas pelos modelos de Fredlund *et al.* (1994) e Van Genuchten (1980).

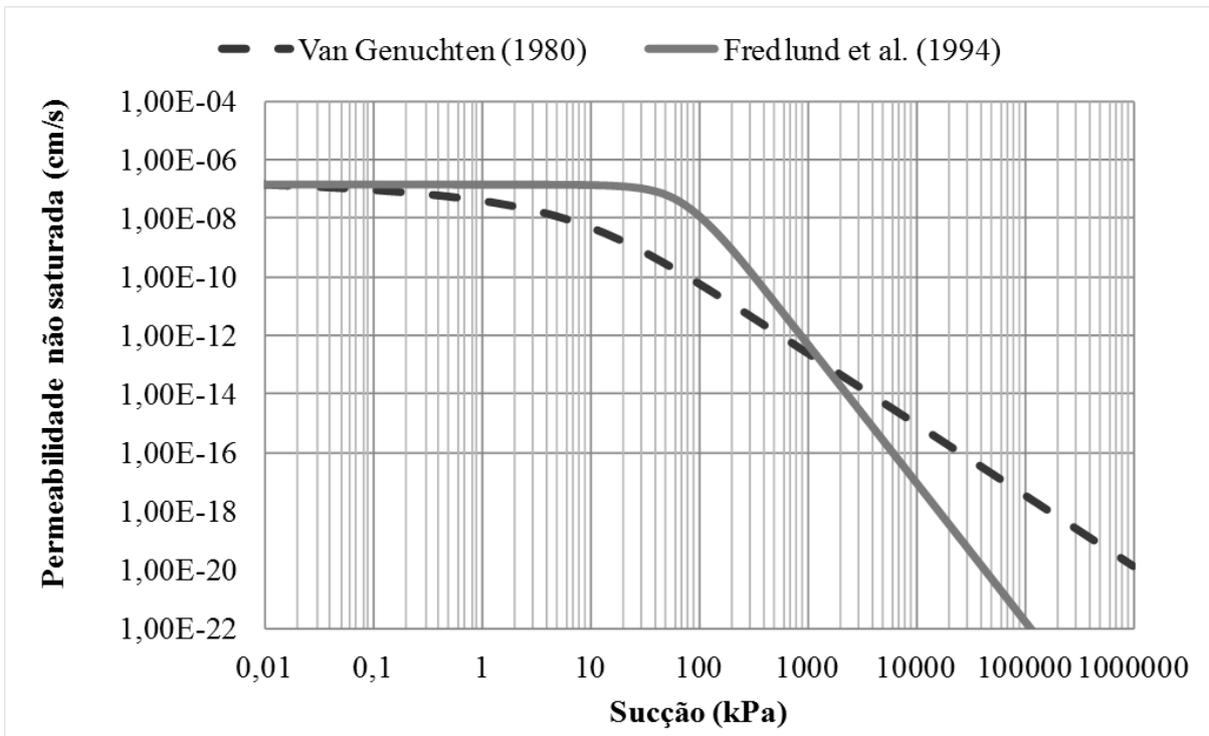


GRÁFICO 4.24 – Comparação das curvas de permeabilidade não saturada do solo argiloso obtidas pelos modelos de Fredlund *et al.* (1994) e Van Genuchten (1980).

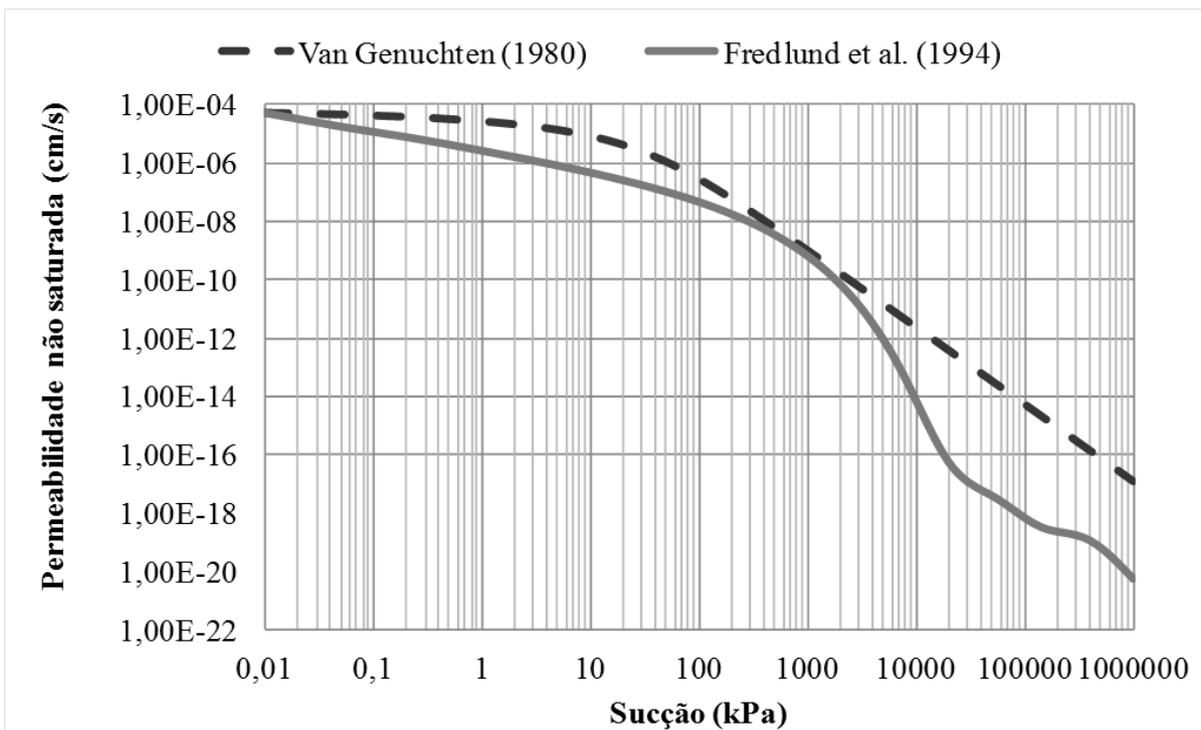


GRÁFICO 4.25 – Comparação das curvas de permeabilidade não saturada do rejeito obtidas pelos modelos de Fredlund *et al.* (1994) e Van Genuchten (1980).

c) Parâmetros térmicos

- Objetivou avaliar a alteração no resultado ao se utilizar parâmetros térmicos variando em função do teor de umidade volumétrico. Para obtenção da curva da condutividade térmica e da curva do calor específico volumétrico do solo em função do teor de umidade volumétrico, adotaram-se, respectivamente, os parâmetros condutividade térmica do mineral iguais a 228 kJ/(dia.m.°C) e calor específico por massa 0,8 kJ/(kg.°C), de acordo com o recomendado por GEO-STUDIO (2008).

d) Parâmetros de vegetação

- Objetivou avaliar a variação do resultado ao se obter o IAF estimado pelo programa. O GRAF. 4.26 compara o IAF estimado pelo usuário e pelo programa;

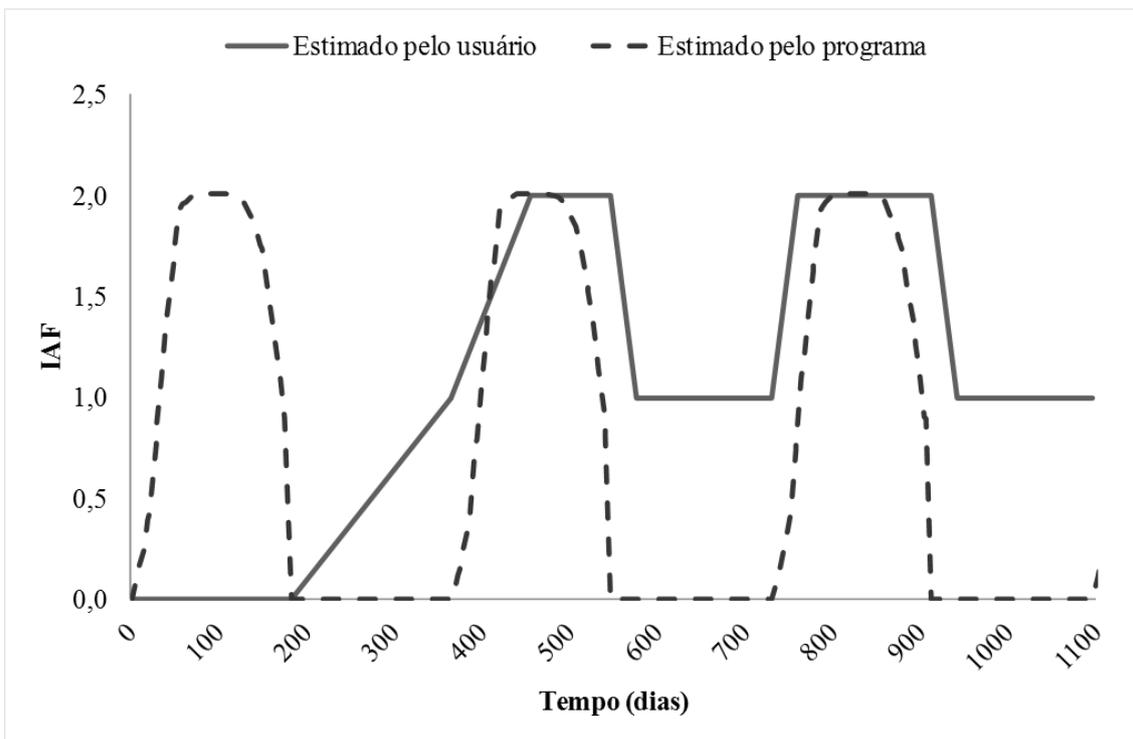


GRÁFICO 4.26 – Comparação do IAF estimado pelo usuário e pelo programa.

- Objetivou avaliar a variação do resultado ao alterar a distribuição da raiz para retangular;
- Objetivou avaliar a variação do resultado ao alterar a profundidade das raízes;
- Objetivou avaliar a variação do resultado se desconsiderar a presença de vegetação.

#### 4.2.2.3 Variação da magnitude dos parâmetros

A TAB. 4.3 apresenta as magnitudes de alguns parâmetros que foram alterados para verificação da influência no resultado final. Procurou-se apresentar valores extremos e intermediários, quando significativos. Os valores em **negrito** se referem à análise de referência.

TABELA 4.3 – Variação dos parâmetros de entrada do modelo.

Parâmetro	Valor
<i>REFERÊNCIA: Alternativa 3 do sistema proposto por Ribeiro (2011)</i>	
Nível d'água	-1 m
	<b>-3 m</b>
	-10 m
Espaçamento da malha de elementos finitos	5 cm
	<b>20 cm</b>
	50 cm
Condutividade térmica do solo	120 kJ/(dia.m.°C)
	200 kJ/(dia.m.°C)
	<b>280 kJ/(dia.m.°C)</b>
	320 kJ/(dia.m.°C)
Calor específico volumétrico do solo	2200 kJ/(m <sup>3</sup> .°C)
	<b>2750 kJ/(m<sup>3</sup>.°C)</b>
	3300 kJ/(m <sup>3</sup> .°C)
	4000 kJ/(m <sup>3</sup> .°C)
Ponto de murcha	200
	<b>1500</b>
	3000
IAF	1
	<b>2,5</b>
	3
Profundidade máxima da raiz	10
	20
	<b>40</b>
	80
	160

### 4.2.3 Alteração dos dados climáticos

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, o clima é o principal fator para escolha do sistema de cobertura mais adequado e eficiente ao local. Para avaliar a variação do resultado ao se alterar os dados climáticos local, foram escolhidos os outros dois climas brasileiros mais comuns: o tropical úmido e o semi-árido.

#### 4.2.3.1 Cima tropical úmido

Os dados do clima tropical úmido foram extraídos do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2012) a partir de normais climatológicas correspondentes ao período compreendido entre 1961 e 1990, em que se escolheu o município de Coari no estado do Amazonas por apresentar dados extremos para este clima com pluviometria média anual de 2.139 mm e bem distribuída ao longo do ano. A TAB. 4.4 apresenta os dados climáticos mensais deste município. Os parâmetros da vegetação foram mantidos para possibilitar comparação com os resultados do estudo de caso.

TABELA 4.4 – Dados climáticos de um município em clima tropical úmido.

Período	Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)		Velocidade do vento (m/s)	Precipitação (mm)	Radiação solar (MJ/m <sup>2</sup> /dia)
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima			
Outubro	31,5	22,4	83	83	0,60	185	18,9
Novembro	31,0	22,5	84	84	0,60	175	18,8
Dezembro	30,5	22,3	82	82	0,60	238	16,7
Janeiro	30,0	21,9	85	85	0,71	231	16,5
Fevereiro	30,1	21,7	82	82	0,71	194	16,5
Março	30,2	22,0	86	86	0,71	245	16,4
Abril	30,1	21,6	82	82	0,71	270	16,2
Maio	30,1	21,8	87	87	0,60	216	15,8
Junho	30,3	21,6	84	84	0,60	119	16,3
Julho	30,7	21,5	83	83	0,50	89	17,9
Agosto	31,7	21,8	82	82	0,60	78	19,6
Setembro	32,0	22,0	82	82	0,60	99	19,2

FONTE - INMET, 2012.

#### 4.2.3.2 Clima semi-árido

Os dados do clima semi-árido também foram extraídos do site do INMET (2012) a partir de normais climatológicas correspondentes ao período compreendido entre 1961 e 1990 e foi

escolhido o município de Belém do São Francisco, no estado de Pernambuco, por apresentar dados extremos para este clima, com pluviometria média anual de 524 mm e concentradas no período chuvoso. A TAB. 4.5 apresenta os dados climáticos mensais deste município. Estas condições não são favoráveis ao crescimento de vegetação, portanto, nas análises, a presença de vegetação não foi considerada para representar uma condição mais próxima da real.

TABELA 4.5 – Dados climáticos de um município em clima semi-árido.

Período	Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)		Velocidade do vento	Precipitação (mm)	Radiação solar
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima			
Outubro	31,5	18,9	74	74	1,90	8	20,8
Novembro	32,6	19,8	73	73	1,30	32	21,4
Dezembro	32,7	20,1	73	73	1,50	57	21,3
Janeiro	32,4	20,5	74	74	2,30	81	21,0
Fevereiro	32,3	20,5	74	74	1,90	73	20,5
Março	31,8	20,6	75	75	2,30	129	19,4
Abril	30,5	20,3	77	77	2,60	83	18,2
Mai	28,4	19,1	79	79	1,90	20	15,8
Junho	26,9	17,7	81	81	2,60	18	14,6
Julho	26,2	16,8	81	81	2,30	13	15,3
Agosto	27,2	16,7	79	79	1,50	4	17,1
Setembro	29,5	17,8	76	76	1,90	6	19,3

FONTE - INMET, 2012.

Os dados mensais foram divididos igualmente em dados diários para serem utilizados no VADOSE/W.

### 4.3 Utilização de rejeito como material de cobertura

Reis *et al.* (2011) afirmam que a utilização de rejeitos da mineração em outros setores já é uma realidade, porém, para a sua viabilização, é necessário que os materiais sejam testados de forma a averiguar a existência de propriedades interessantes frente a um uso específico. Junqueira *et al.* (2011a) complementam que, recentemente, esforços têm sido feitos para utilizar os próprios rejeitos de mineração como materiais para a construção de coberturas, porém trabalhos sobre o assunto ainda não foram amplamente divulgados.

As principais vantagens na utilização do rejeito como material de construção de sistemas de cobertura são:

- Redução do volume de resíduos a serem dispostos em barragens;
- Transformação do resíduo em produto de venda;

- Redução do volume requerido de material para construção da cobertura, evitando a utilização de materiais naturais que geram impactos ambientais em área de empréstimo;
- Possibilidade de aquisição de material de construção a um menor custo.

#### 4.3.1 Condicionantes para utilização do rejeito como material de cobertura

O dimensionamento de sistemas de cobertura com a utilização de rejeito pode ser realizado conforme metodologias já consolidadas de coberturas com solos. Porém, a utilização de rejeito conduz como peculiaridade a necessidade de análise prévia de viabilidade técnica e econômica do material.

As seguintes etapas são propostas e devem ser realizadas antes do dimensionamento da cobertura:

- Análise do comportamento geoquímico do material;
- Análise dos parâmetros geotécnicos do material;
- Análise de viabilidade econômica.

##### 4.3.1.1 Análise do comportamento geoquímico do rejeito

Visto que permanecerão em contato com água e ar, o rejeito poderá ser utilizado desde que seja inerte. Portanto, primeiramente se deve verificar o potencial de geração de drenagem ácida do rejeito e de lixiviação de metais presentes no material que será utilizado como material de construção do sistema de cobertura. Caso o potencial de geração de drenagem ácida seja confirmado, deve-se realizar tratamento deste material. Como apresentado no Capítulo 2, os principais meios de tratamento são a retirada ou a neutralização do sulfeto presente no material. Ressalta-se a importância da avaliação quanto ao potencial para lixiviação, visto que, metais como o arsênio podem ser lixiviados mesmo em condições não ácidas.

A utilização de rejeito não inerte e sem tratamento ainda pode ser avaliada em camadas inferiores de sistemas de coberturas com vários componentes. Como exemplo de possível utilização, em barreiras capilares de base para evitar o movimento ascendente de contaminantes a partir do rejeito.

#### 4.3.1.2 Análise dos parâmetros geotécnicos do rejeito

Dentre os vários tipos de sistemas de cobertura, cada um deles requer um tipo de material que deve possuir características necessárias para compor o tipo de cobertura planejado. Caso o rejeito possua algum parâmetro geotécnico que não atenda à sua finalidade, pode-se ainda considerar, se possível, tratamento para correção. A mistura de diferentes materiais também pode ser considerada. Ressalta-se que, para analisar e dimensionar a utilização do rejeito em um sistema de cobertura deve-se considerar suas propriedades pós-tratamentos geoquímicos e/ou geotécnicos, se estes forem necessários.

#### 4.3.1.3 Análise de viabilidade econômica

Para verificar se a utilização de um tipo de rejeito é economicamente viável em sistemas de coberturas em solos, deve-se comparar o custo da alternativa com a utilização de materiais naturais com o custo da alternativa com a utilização do rejeito em uma dada fração deste sistema. A seguir, os aspectos que devem ser abordados nestas análises comparativas, considerando apenas os pontos em que as alternativas se diferem. Portanto, não representam todos os itens para se quantificar o custo total de um dado sistema de cobertura.

Utilização somente de materiais naturais:

- Ônus referentes ao licenciamento ambiental, extração e transporte dos materiais naturais das áreas de empréstimos até a barragem a ser coberta.

Utilização parcial ou total de rejeito:

- Bônus referente a não disposição do volume de rejeito utilizado na cobertura e que seria disposto em barragens;
- Transporte do material, quando não utilizado na barragem de origem do material;
- Custos de tratamento para adequar o rejeito às condições geoquímicas e geotécnicas adequadas.

#### 4.3.2 Simulação de utilização de diferentes tipos de rejeito como material de construção de cobertura

Com objetivo de verificar o potencial de utilização do rejeito como material de construção em sistemas de cobertura, este item apresenta análises numéricas realizadas para diferentes tipos de rejeitos brasileiros. Foram coletados dados de caracterizações tecnológicas apresentadas na literatura de rejeitos provenientes do processamento de minério de ferro, bauxita, fosfato e ouro. A TAB. 4.6 consolida os parâmetros geotécnicos dos rejeitos, a origem das respectivas áreas de empréstimo e as fontes dos resultados. O rejeito de ouro corresponde ao mesmo rejeito apresentado no estudo de caso.

TABELA 4.6 – Parâmetros geotécnicos, origem dos rejeitos e fonte de obtenção dos resultados.

<b>Tipo de rejeito</b>	<b>Origem</b>	<b>G</b>	<b>e</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>k<sub>s</sub> (cm/s)</b>	<b>Fonte dos resultados</b>
<b>Minério de ferro</b>	Itabirito/MG	3,420	0,80	31,0	17,0	7,00 x 10 <sup>-6</sup>	FONSECA (2012)
<b>Bauxita</b>	Ouro Preto/MG	3,550	1,90	63,0	29,0	2,00 x 10 <sup>-6</sup>	VILLAR (2002)
<b>Fosfato Overflow</b>	Araxá/MG	3,520	1,35	NP	NP	5,00 x 10 <sup>-4</sup>	BITTAR (2006)
<b>Fosfato Underflow</b>	Araxá/MG	3,280	1,35	NP	NP	4,00 x 10 <sup>-3</sup>	BITTAR (2006)
<b>Ouro</b>	Paracatu/MG	2,822	0,91	38,0	21,1	5,30 x 10 <sup>-5</sup>	RIBEIRO (2011)

É importante que os ensaios para obtenção dos índices de vazios e dos coeficientes de permeabilidade obtidos sejam realizados com grau de compactação equivalente às condições que estes materiais serão utilizados em campo.

O GRAF. 4.27 apresenta as curvas granulométricas dos rejeitos.

ARGILA		SILTE		AREIA			PEDREGULHO		
				Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso

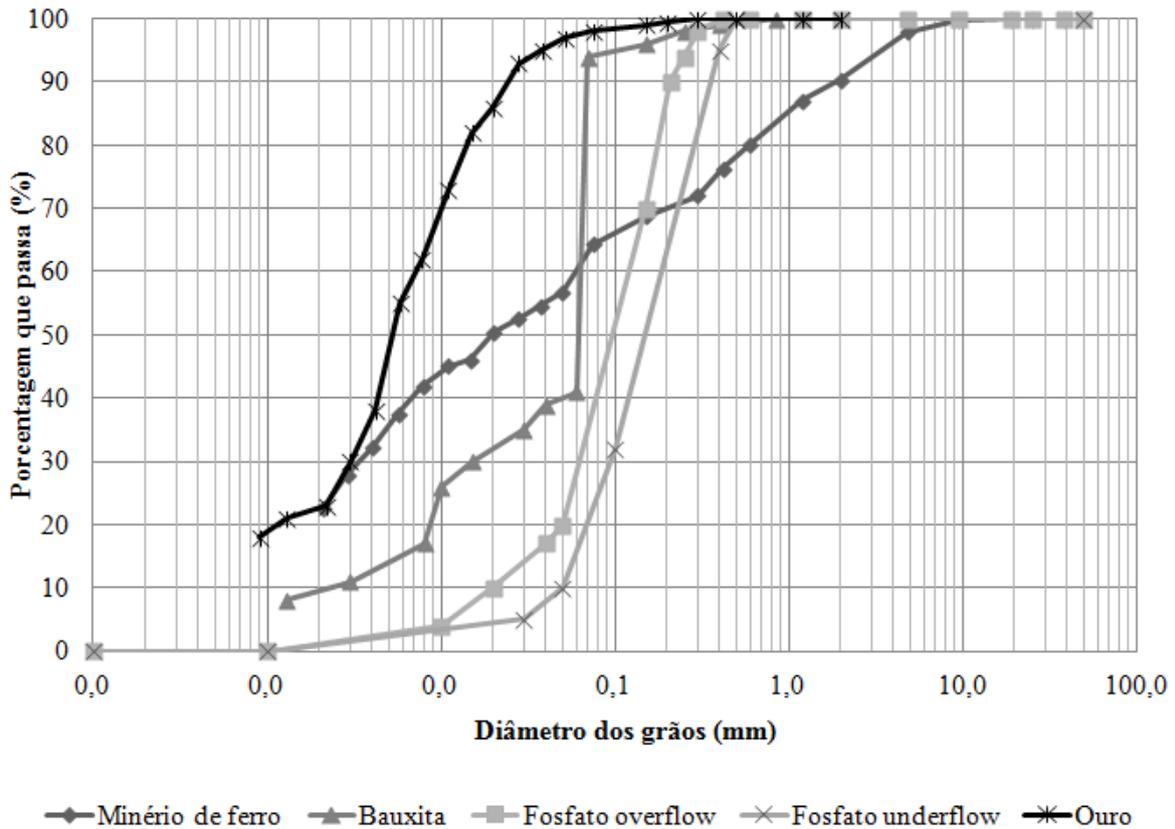


GRÁFICO 4.27 – Curvas granulométricas dos rejeitos proveniente do processamento de minério de ferro, bauxita, fosfato overflow, fosfato underflow e ouro.

Os GRAF. 4.28 a 4.31 apresentam as curvas de retenção de umidade dos rejeitos para construção do sistema de cobertura. As curvas do rejeito proveniente do processamento do minério de ferro e de fosfato foram obtidas pelo VADOSE/W a partir dos respectivos parâmetros geotécnicos e curvas granulométricas de acordo com o método proposto por Aubertin *et al.* (2003). A curva do rejeito de ouro foi apresentada no GRAF. 4.6.

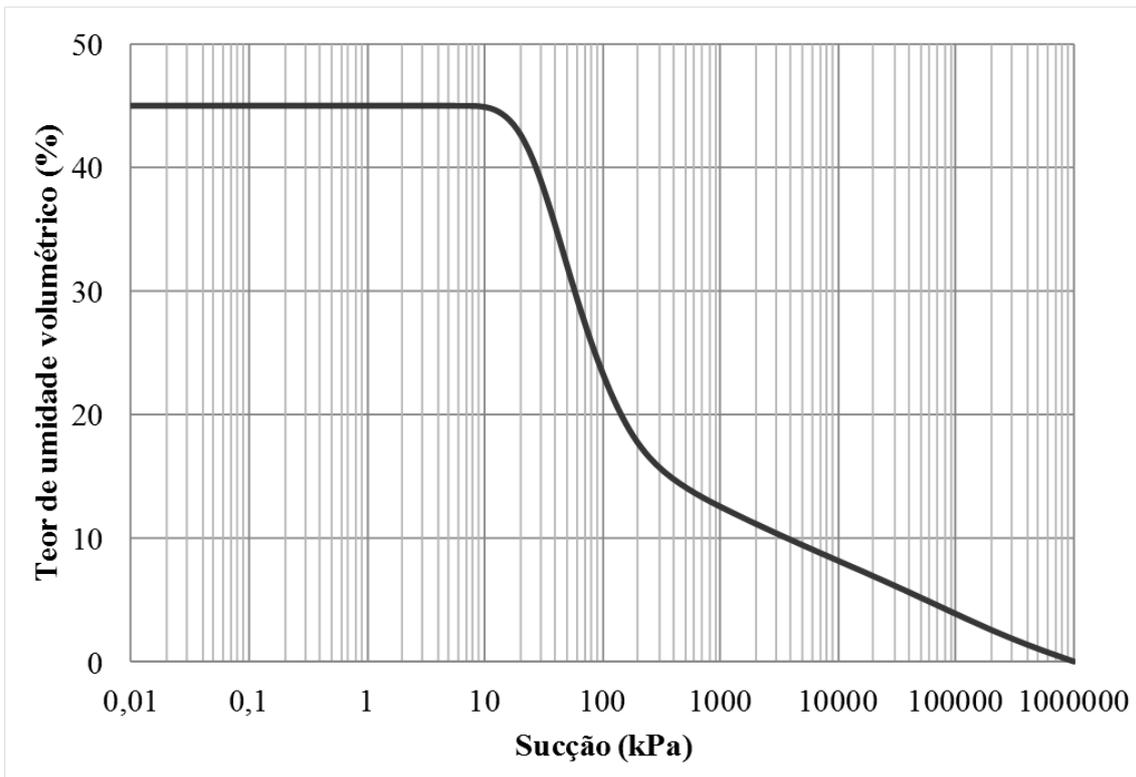


GRÁFICO 4.28 – Curva de retenção de umidade do rejeito proveniente do processamento de minério de ferro a partir de sua granulometria, de acordo com o método proposto por Aubertin *et al.* (2003).

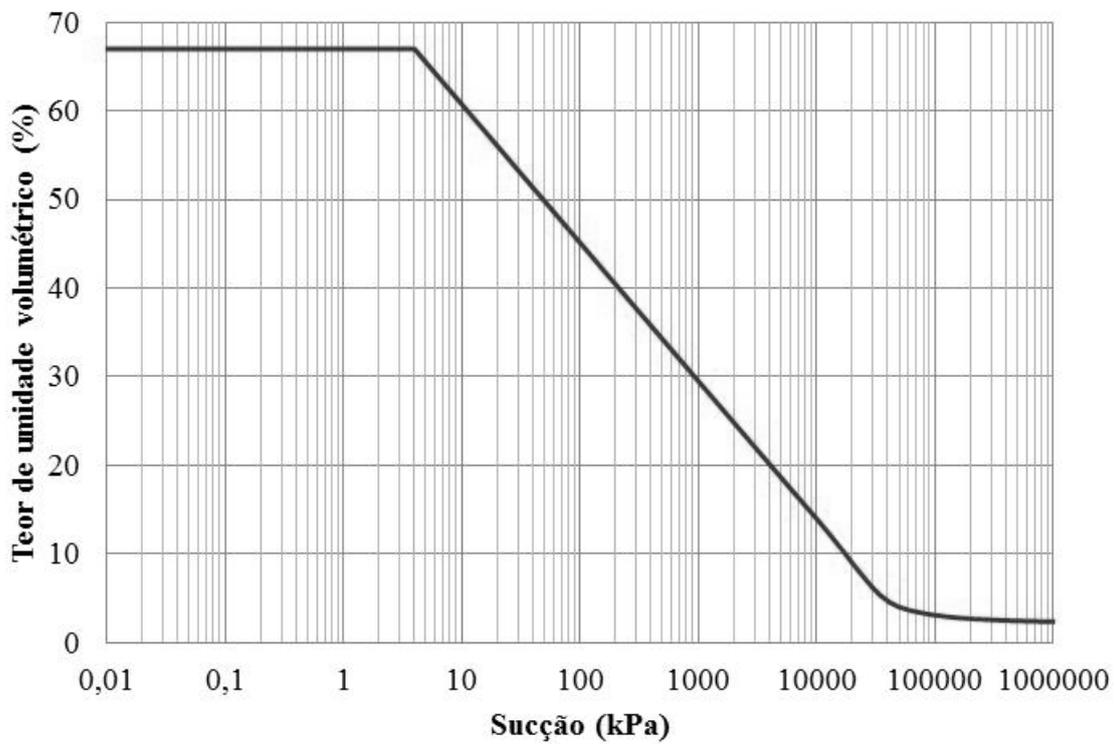


GRÁFICO 4.29 – Curva de retenção de umidade do rejeito proveniente do processamento de bauxita.  
 FONTE - VILLAR, 2002.

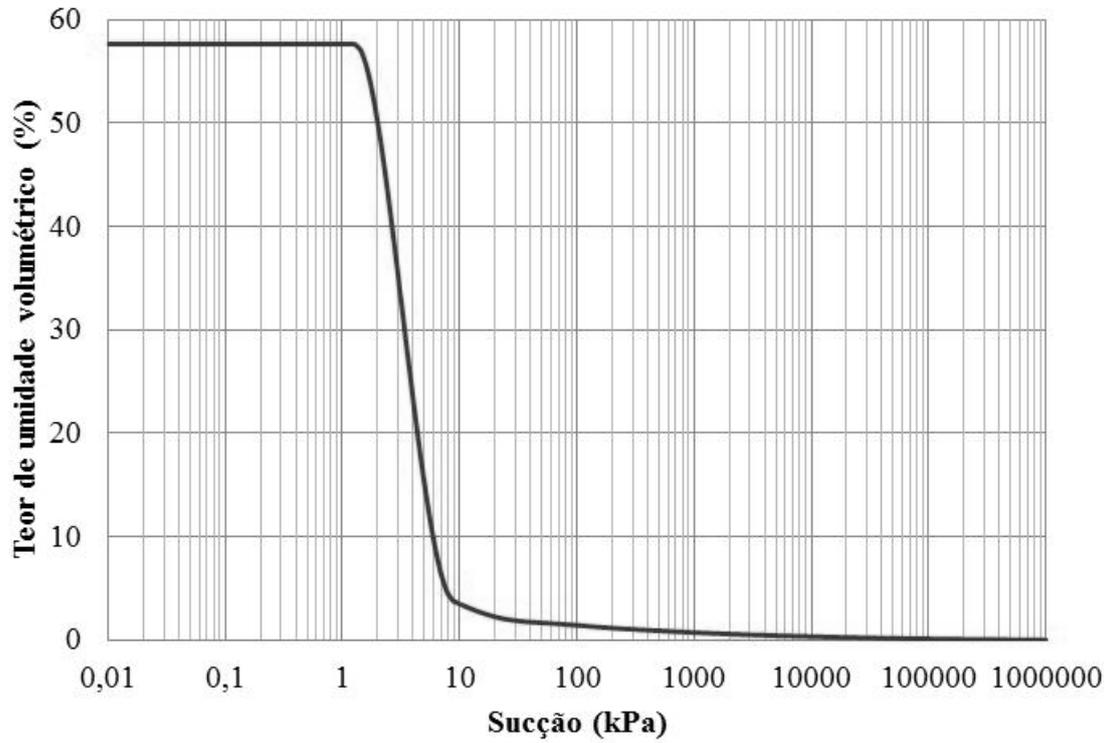


GRÁFICO 4.30 – Curva de retenção de umidade do rejeito proveniente do processamento de fosfato (overflow) a partir de sua granulometria, de acordo com o método proposto por Aubertin *et al.* (2003).

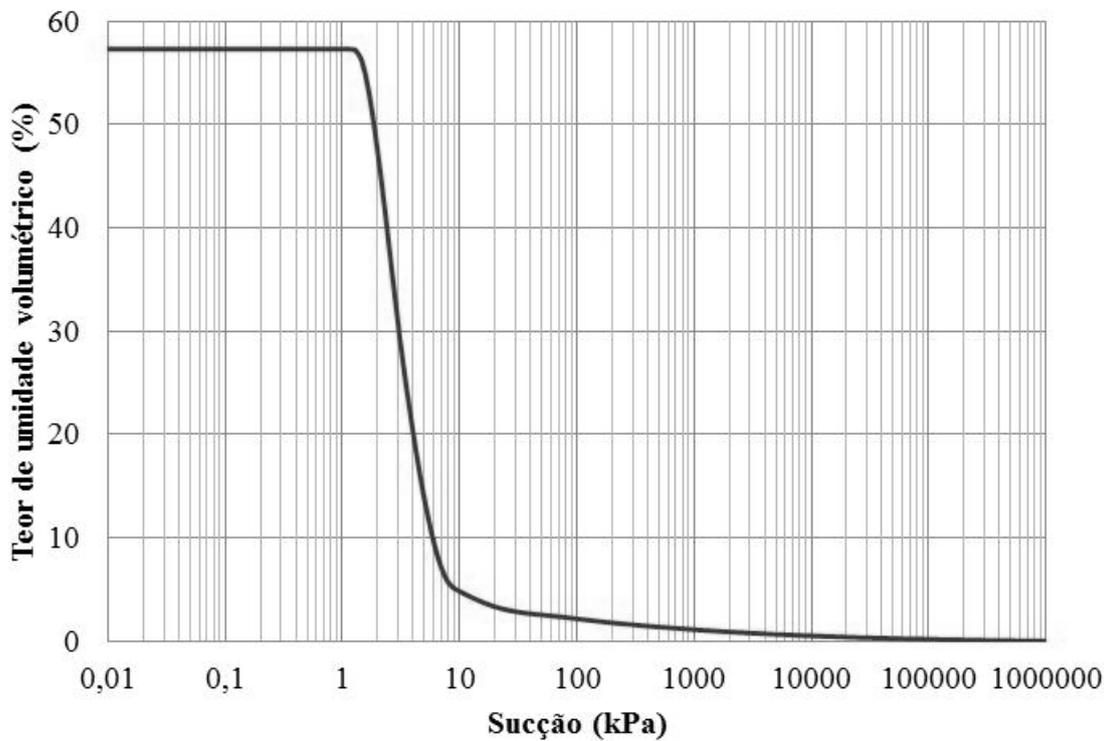


GRÁFICO 4.31 – Curva de retenção de umidade do rejeito proveniente do processamento de fosfato (underflow) a partir de sua granulometria, de acordo com o método proposto por Aubertin *et al.* (2003).

A metodologia escolhida para cálculo da permeabilidade não saturada para todos os materiais a partir da curva de retenção de umidade foi a de Fredlund *et al.* (1994). O GRAF. 4.32 apresenta as curvas permeabilidade não saturadas estimadas pelo programa.

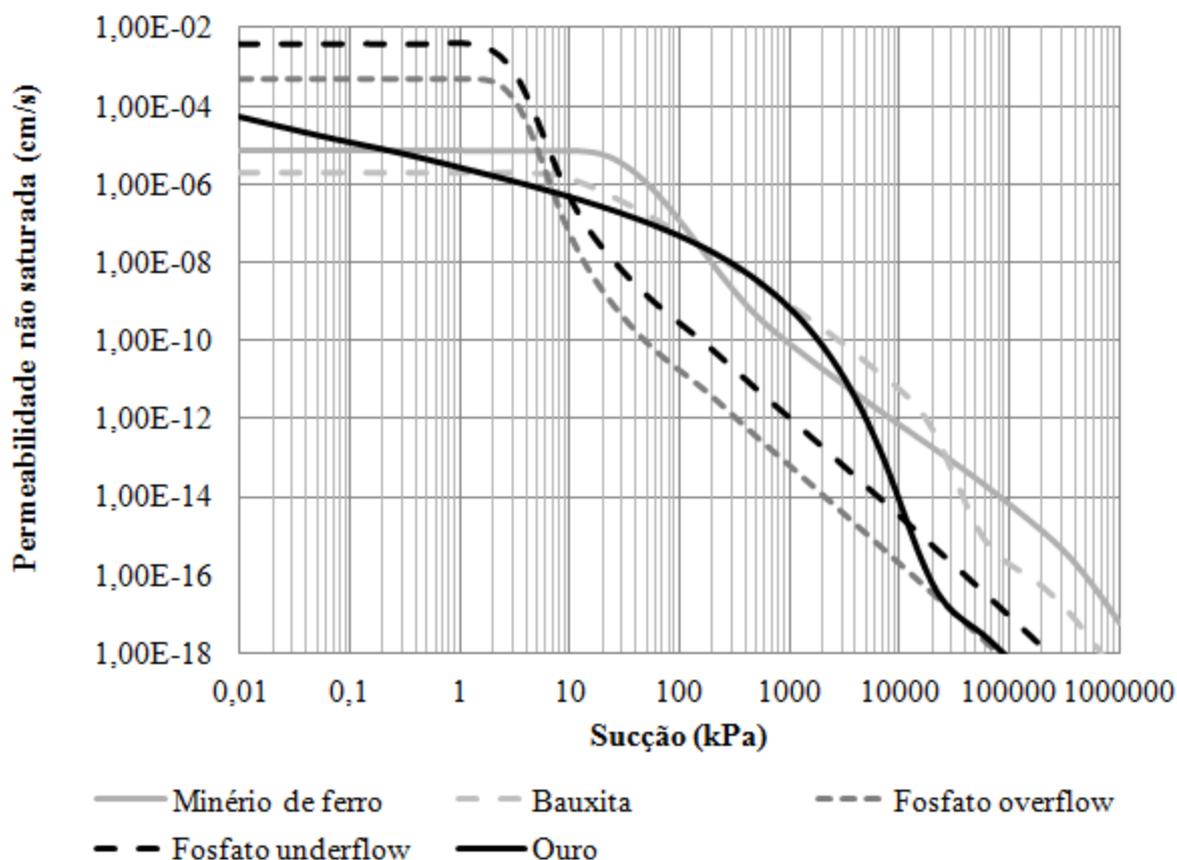


GRÁFICO 4.32 – Curvas de permeabilidade não saturada do rejeito proveniente do processamento de minério de ferro, bauxita, fosfato overflow, fosfato underflow e ouro obtida pelo método de Fredlund *et al.* (1994).

A partir da caracterização dos rejeitos, será verificado o potencial de utilização destes materiais em construção de sistemas de cobertura. Os rejeitos com granulometria predominantemente siltosa, que incluem os rejeitos de minério de ferro, bauxita, fosfato/overflow e ouro, serão utilizados na camada de armazenamento e liberação. O underflow proveniente da ciclonagem do rejeito do processamento de fosfato foi utilizado como camada de barreira capilar por apresentar granulometria arenosa. Para permitir comparação com outros resultados e análise crítica do resultado, escolheu-se a alternativa 3 do sistema proposto por Ribeiro (2011) na análise numérica dos materiais siltosos e a alternativa 3 do sistema evapotranspirativo com barreira capilar, conforme indicado na TAB. 4.2.

## 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises numéricas realizadas, de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 4, seguidas de análises críticas e discussões.

### 5.1 Resultado do estudo de caso

Para cada alternativa de sistema de cobertura, foram calculadas as magnitudes das infiltrações em milímetros por metro quadrado da cobertura e sua porcentagem em relação ao total de precipitação durante os 3 anos (igual à 4.605 mm), além de analisada a variação do grau de saturação do rejeito. O cálculo para a condição sem cobertura também foi realizado para servir de referência e para que se possa verificar a eficiência das soluções apresentadas.

A partir dos resultados das análises numéricas foi proposta uma metodologia para seleção das alternativas de coberturas para reservatórios de rejeito sendo esta estabelecida em 3 etapas:

- Na primeira etapa são eliminadas as alternativas que ultrapassam a taxa de infiltração máxima aceitável para o projeto e/ou que geram variação no grau de saturação em qualquer profundidade do rejeito. Conforme estabelecido anteriormente, o valor de infiltração máximo considerado aceitável neste estudo é de 3% da precipitação total ocorrida no período analisado;
- Na segunda etapa da seleção, para cada tipo de sistema de cobertura, prossegue somente a alternativa de menor espessura, considerando que a mesma atende o critério de projeto e necessita de uma menor quantidade de material de construção;
- A etapa final definirá a melhor alternativa da etapa anterior a partir da análise técnica e econômica. A análise técnica envolve o estudo da disponibilidade de material de construção e o estudo da alternativa mais adequada às condições climáticas locais. A análise econômica engloba todos os custos para construção da solução final, entretanto o presente trabalho não aborda custos.

A TAB. 5.1 apresenta os resultados das análises numéricas do estudo de caso apresentado no Capítulo 4.

TABELA 5.1 – Resultado do estudo de caso.

Tipo de cobertura		Geometria proposta					Resultado VADOSE/W			Escolha de alternativa		
Sistema	Camadas	Alt.	Espessura da camada (m)				Infiltração		Análise do grau de saturação do rejeito	Infiltração aceitável	Menor espessura por tipo	Decisão final
			Orgânico	Argiloso	Arenoso	Total	(mm)	(%)				
Sem cobertura		-	-	-	-	-	-	302,3	6,6%	Satura completamente	-	-
Sistema convencional	Barreira hidráulica	1	0,2	-	0,5	-	<b>0,7</b>	82,2	1,8%	Eleva 10%		
		2	0,2	-	1,0	-	<b>1,2</b>	42,4	0,9%	Eleva 3%		
		3	0,2	-	2,0	-	<b>2,2</b>	10,8	0,2%	Não varia	X	X
		4	0,2	-	4,0	-	<b>4,2</b>	4,0	0,1%	Não varia	X	
Sistema evapotranspirativo	Monolítica	1	0,2	0,5	-	-	<b>0,7</b>	309,1	6,7%	Satura completamente		
		2	0,2	1,0	-	-	<b>1,2</b>	304,0	6,6%	Satura completamente		
		3	0,2	2,0	-	-	<b>2,2</b>	206,1	4,5%	Satura completamente		
		4	0,2	4,0	-	-	<b>4,2</b>	0,1	0,0%	Não varia	X	X
Sistema proposto por Ribeiro (2011)	Barreira capilar	1	0,2	0,5	-	0,4	<b>1,1</b>	339,1	7,4%	Satura completamente		
		2	0,2	1,0	-	0,4	<b>1,6</b>	298,7	6,5%	Satura completamente		
		3	0,2	2,0	-	0,4	<b>2,6</b>	0,0	0,0%	Não varia	X	X
		4	0,2	4,0	-	0,4	<b>4,6</b>	0,0	0,0%	Não varia	X	
Sistema proposto por Ribeiro (2011)	Armazenamento e liberação e barreira hidráulica	1	0,2	0,5	0,5	-	<b>1,2</b>	142,2	3,1%	Satura completamente		
		2	0,2	1,0	0,5	-	<b>1,7</b>	138,6	3,0%	Satura completamente		
		3	0,2	2,0	0,5	-	<b>2,7</b>	130,8	2,8%	Eleva 12%		
		4	0,2	4,0	0,5	-	<b>4,7</b>	0,1	0,0%	Não varia	X	X

O GRAF. 5.1 apresenta o fluxo de água na base do sistema de cobertura selecionado para ilustrar a saída do programa VADOSE/W que permite a obtenção deste resultado. Ressalta-se que o fluxo líquido acumulado é dado em unidade de volume pelo programa e que adotar a largura da geometria da cobertura em 1m facilita nas conversões para unidade de distância.

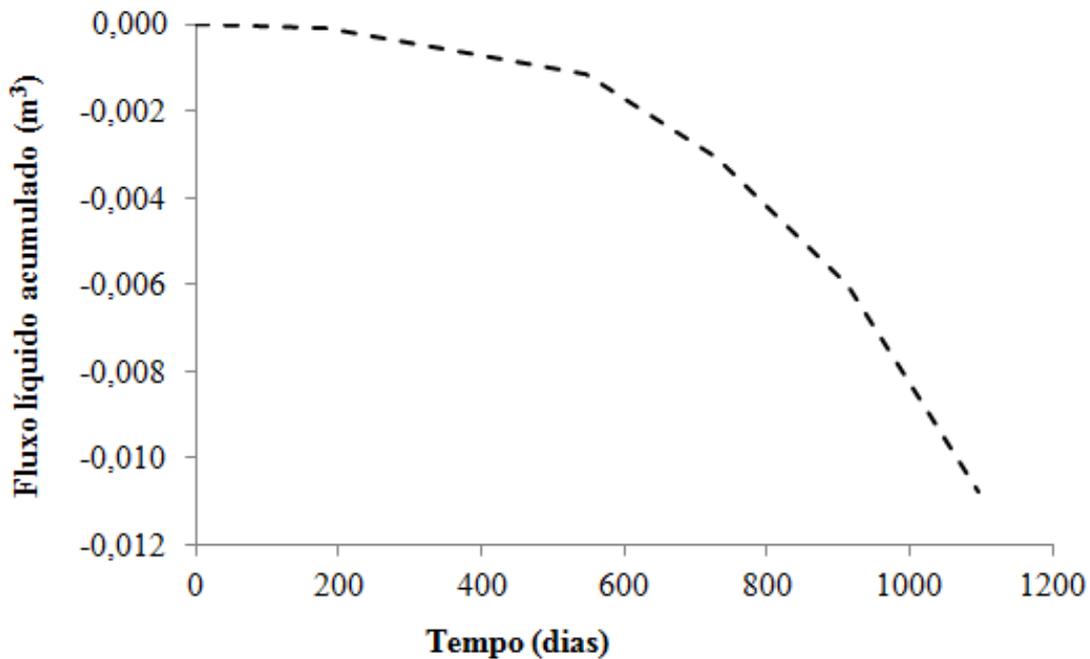


GRÁFICO 5.1 – Fluxo de água na base do sistema de cobertura selecionado.

A TAB. 5.1 indica que, das dezesseis alternativas propostas, apenas seis apresentam taxa de infiltração aceitável e nenhuma variação do grau de saturação do rejeito. Das quatro alternativas da segunda etapa, optou-se pelo sistema convencional baseado nos seguintes critérios técnicos:

- O sistema evapotranspirativo com barreira capilar não é eficiente em condições climáticas de moderada a elevadas precipitações;
- As alternativas do sistema evapotranspirativo monolítico e do sistema proposto por Ribeiro (2011) que atendem aos requisitos apresentam espessura muito elevada;
- O sistema convencional, apesar de demandar maior cuidado na construção e de manutenção, apresentou a melhor relação entre o desempenho e a espessura do sistema de cobertura.

A redução da taxa de infiltração é apenas um dos critérios para estudo do desempenho de um sistema de cobertura, que deve ser realizado mediante análise do balanço hídrico do sistema e do perfil de saturação ao longo do tempo. O balanço hídrico do sistema selecionado é apresentado no GRAF. 5.2.

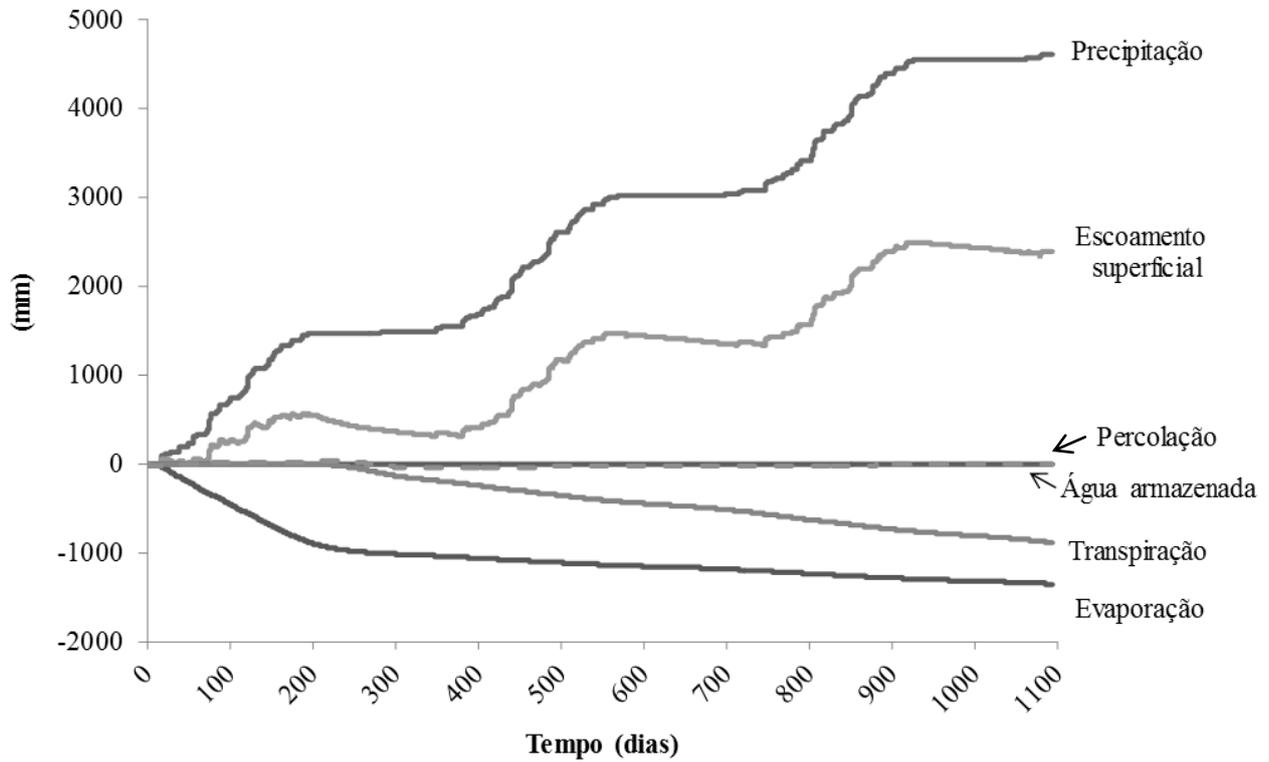


GRÁFICO 5.2 – Balanço hídrico do sistema selecionado.

O gráfico da GRAF. 5.3 apresenta a distribuição de toda precipitação que incide na superfície do sistema.

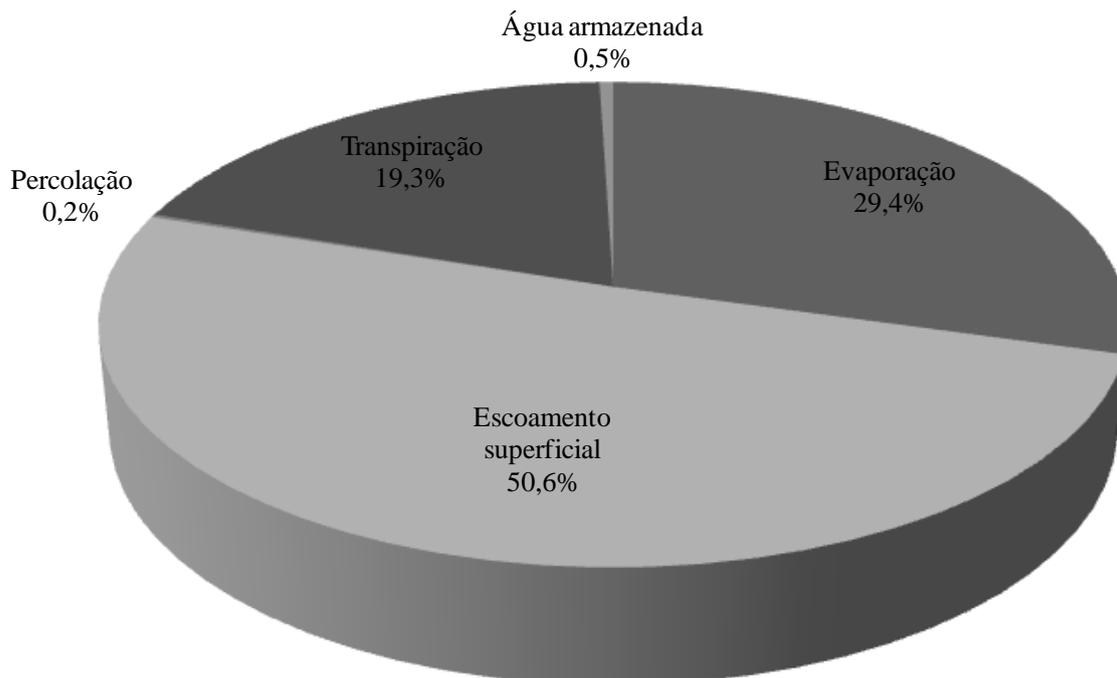


GRÁFICO 5.3 – Distribuição da precipitação que incide sobre a superfície do sistema selecionado.

Os GRAF. 5.2 e 5.3 indicam que 50,6% da precipitação que incide sobre a cobertura escoam superficialmente, 48,7% evapotranspira, 0,5% permanece armazenado na cobertura e apenas 0,3% percola pela cobertura e atinge o rejeito.

O perfil de saturação (GRAF. 5.4) indica o grau de saturação dos materiais da cobertura e do rejeito ao longo da profundidade no final de cada ano do período analisado. Verifica-se uma pequena variação do grau de saturação da argila que constitui a barreira hidráulica ao longo do tempo e nenhuma alteração deste valor no rejeito.

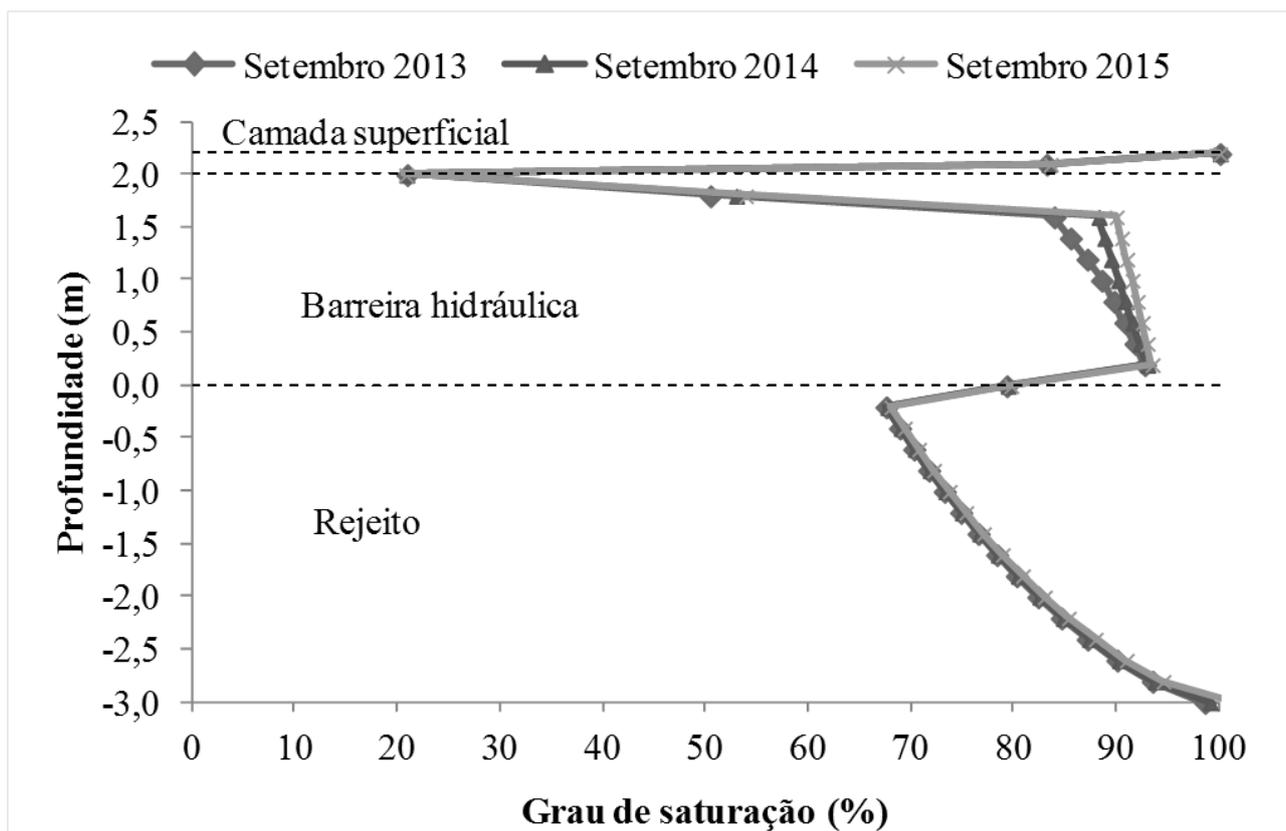


GRÁFICO 5.4 – Perfil de saturação do sistema selecionado.

Conforme Amorim (2008), o fluxo de ar é muito pequeno em solos com grau de saturação acima de 80% e, como a barreira hidráulica se manteve acima deste valor durante todo o período analisado, pode-se afirmar que esta cobertura também possui eficiência contra a passagem de oxigênio para o rejeito. Com a baixa infiltração da água para o rejeito, a não variação do grau de saturação deste material e o impedimento da passagem de oxigênio, sugere-se que o sistema de cobertura atende aos requisitos para impedir a geração de DAM.

## 5.2 Resultado das análises de sensibilidade

### 5.2.1 Alteração no período da análise

Ao se alterar o período da análise para 5 anos, verifica-se o aumento do valor da infiltração para o rejeito e do grau de saturação deste material, porém a porcentagem da infiltração em relação ao novo total de precipitação (igual à 7.675 mm) diminuiu. A TAB. 5.2 apresenta o resultado comparado ao valor de referência.

TABELA 5.2 – Resultado da alteração do período da análise.

Tipo de parâmetro	Metodologia	Total de precipitação (mm)	Infiltração		Saturação do rejeito
			(mm)	(%)	
<i>REFERÊNCIA: Alternativa 3 do sistema proposto por Ribeiro (2011)</i>					
		4.605	130,8	2,8%	Eleva 12%
Tempo	5 anos	7.675	157,9	2,1%	Eleva 14%

### 5.2.2 Alteração dos métodos de obtenções ou tratamento dos parâmetros

A TAB. 5.3 apresenta os resultados ao se alterar os métodos de obtenção ou de tratamento dos parâmetros comparado ao valor de referência.

TABELA 5.3 – Resultado da alteração dos métodos de obtenções ou de tratamento dos parâmetros.

Tipo de parâmetro	Metodologia	Infiltração		Saturação do rejeito
		(mm)	(%)	
<i>REFERÊNCIA: Alternativa 3 do sistema proposto por Ribeiro (2011)</i>				
		130,8	2,8%	Eleva 12%
Climáticos	Dados diários em médias diárias a partir de dados mensais	192,2	4,2%	Satura parcialmente
	Pluviometria diária, demais dados diários em médias diárias a partir de dados mensais	0,7	0,0%	Não varia
	Radiação solar estimada pelo programa	141,0	3,1%	Eleva 12%
Geotécnicos	$M_v$ obtido por ensaio de adensamento	130,8	2,8%	Eleva 12%
	Curva de retenção de umidade a partir da curva granulométrica	203,9	4,4%	Satura totalmente
	Curva de permeabilidade não saturada obtida pelo método de Van Genuchten	171,3	3,7%	Satura parcialmente
Térmico	Parâmetros térmicos variáveis	133,7	2,9%	Satura parcialmente
Vegetação	IAF estimado pelo programa	286,0	6,2%	Satura totalmente
	Distribuição retangular da raiz no solo	144,0	3,1%	Eleva 12%
	Sem vegetação	307,8	6,7%	Satura totalmente

Quando todos os dados climáticos são obtidos a partir de dados mensais e divididos em médias diárias, a infiltração apresentou maior valor. Porém, quando os dados de pluviometria são os

dados reais diários e os demais são mensais divididos em médias diárias, a infiltração reduziu. Esta análise permite verificar a influência da obtenção dos dados climáticos no resultado final e concluir que os dados climáticos devem, preferencialmente, ser obtidos de leituras diárias de estações meteorológicas.

Ao se optar pela radiação solar calculada pelo programa que, conforme GRAF. 4.23, é ligeiramente inferior aos valores obtidos em campo, verifica-se uma pequena elevação do valor da infiltração quando comparado com a condição de referência. Conclui-se que, caso não se tenha os dados de radiação solar reais, a estimativa pelo programa apresenta valores com pequenos desvios.

O valor de  $M_v$  igual a  $1,00 \times 10^{-5}$  1/kPa conforme recomendado pelo VADOSE/W e o valor obtido pelo ensaio de adensamento igual a  $3,00 \times 10^{-4}$  1/kPa realizado em laboratório geraram o mesmo valor de infiltração para a argila (TAB.5.3), porém, a alteração de apenas um dos materiais do sistema de cobertura não permite avaliar a influência no resultado final. Não foram encontrados valores típicos de  $M_v$  na literatura para variação e verificação da real sensibilidade do programa a esta faixa, entretanto elevou-se o valor de  $M_v$  de modo a permitir a comprovação de que até o valor  $1,00 \times 10^{-3}$  1/kPa nenhuma curva de retenção de umidade de nenhum dos materiais envolvidos sofreu variação.

Quando se obteve a curva de retenção de umidade de todos os materiais envolvidos a partir da curva granulométrica pelo método de Aubertin *et al.* (2003), a infiltração apresentou variação. Esta estimativa pode ser uma ferramenta bastante útil durante as fases preliminares de um projeto, porém não se deve substituir os ensaios necessários para obtenção de dados mais realistas.

Ao alterar o modelo de Fredlund *et al.* (1994) para o modelo de Van Genuchten (1980) para a obtenção da curva de permeabilidade não saturada dos materiais verificou-se um aumento da infiltração, portanto a escolha do método de determinação da curva de permeabilidade influencia o resultado.

Quanto à alteração os parâmetros térmicos como uma função do teor de umidade volumétrico, verificou-se uma pequena diferença em relação à utilização de valores constantes. Portanto, a escolha do método não influencia o resultado deste estudo.

O IAF estimado pelo programa é nulo durante os períodos de seca e pode não condizer com a realidade das espécies vegetais de clima tropical. Ao adotá-lo, verificou-se um aumento significativo da infiltração devido à redução da transpiração nestes períodos. Ao se optar pela distribuição retangular das raízes em vez de triangular, o resultado sofre um desvio muito pequeno. Por fim, caso a vegetação não seja considerada na análise, a infiltração aumentou e o rejeito abaixo da cobertura saturou confirmando a importância da vegetação.

### 5.2.3 Varição da magnitude dos parâmetros

A TAB. 5.4 apresenta os resultados ao alterar a magnitude entres extremos possíveis de sete parâmetros que foram definidos a partir da literatura ou da escolha arbitrária.

- Nível d'água: ao aproximar o nível d'água da superfície do solo o solo saturou antes do primeiro período chuvoso. O resultado indicou um menor valor de infiltração, porém este não deve ser analisado de forma isolada, visto que a saturação do rejeito impede maior acúmulo de água no mesmo. Ao se abaixar consideravelmente o nível d'água, pouca variação ocorreu no resultado, embora esperava-se uma maior variação, considerando que quanto mais profundo o lençol, maior o gradiente hidráulico e maior será a infiltração. Portanto, para os casos em que nível d'água se encontra próximo da superfície, a cobertura poderá não apresentar a eficiência desejável;
- Espaçamento da malha de elementos finitos: ao reduzir o espaçamento entre as malhas em 4 vezes ou aumentar em 2,5 vezes, o resultado sofre pequena variação. Portanto o espaçamento de 20 cm é um valor aceitável que concilia precisão e menor tempo da análise numérica. O espaçamento da malha deve ser bem menor perto da superfície onde ocorre a interação solo e parâmetros climáticos ocasionando significativas variações da sucção. Esse espaçamento pode ser aumentado em profundidade.
- Condutividade térmica do solo: a infiltração apresentou comportamento inversamente proporcional à condutividade térmica e não mostrou ter grande influência no resultado;
- Calor específico volumétrico do solo: o calor específico apresentou comportamento diretamente proporcional à infiltração e também não mostrou grande influência no resultado;
- Ponto de murcha: a variação deste parâmetro indicou variações muito pequenas no resultado;
- IAF: as pequenas variações deste parâmetro indicaram variações proporcionais no resultado indicando uma grande sensibilidade;
- Profundidade máxima da raiz: o resultado é muito sensível à profundidade da raiz.

Conclui-se que os valores inicialmente propostos para o nível d'água, para o espaçamento da malha de elementos finitos e para os parâmetros térmicos são aceitáveis e podem servir de referência para o dimensionamento de sistemas de cobertura.

O ponto de murcha inicialmente utilizado também pode ser utilizado, porém os demais parâmetros da vegetação devem ser estudados para cada caso. O IAF e a profundidade da raiz devem ser escolhidos cuidadosamente de forma a se aproximar ao máximo da condição real de campo, considerando a alta influência destes no dimensionamento. Sugere-se levantamento das características das espécies vegetais existentes, realização de teste de campo e participação de biólogos na definição destes parâmetros.

TABELA 5.4 – Resultado da alteração da magnitude dos parâmetros.

Parâmetro	Valor	Infiltração		Saturação do rejeito
		(mm)	(%)	
<i>REFERÊNCIA: Alternativa 3 do sistema proposto por Ribeiro (2011)</i>		<b>130,8</b>	<b>2,8%</b>	<b>Eleva 12%</b>
Nível d'água	-1 m	54,6	1,2%	Saturou logo
	<b>-3 m</b>	<b>130,8</b>	<b>2,8%</b>	<b>Eleva 12%</b>
	-10 m	132,1	2,9%	Eleva 12%
Espaçamento da malha de elementos finitos	5 cm	138,3	3,0%	Eleva 14%
	<b>20 cm</b>	<b>130,8</b>	<b>2,8%</b>	<b>Eleva 12%</b>
	50 cm	149,0	3,2%	Eleva 12%
Condutividade térmica do solo	120 kJ/(dia.m.°C)	156,0	3,4%	Eleva 13%
	200 kJ/(dia.m.°C)	139,2	3,0%	Eleva 12%
	<b>280 kJ/(dia.m.°C)</b>	<b>130,8</b>	<b>2,8%</b>	<b>Eleva 12%</b>
	320 kJ/(dia.m.°C)	121,7	2,6%	Eleva 10%
Calor específico volumétrico do solo	2200 kJ/(m³.°C)	93,6	2,0%	Eleva 8%
	<b>2750 kJ/(m³.°C)</b>	<b>130,8</b>	<b>2,8%</b>	<b>Eleva 12%</b>
	3300 kJ/(m³.°C)	159,0	3,5%	Eleva 14%
	4000 kJ/(m³.°C)	149,8	3,3%	Eleva 13%
Ponto de murcha	200	135,0	2,9%	Eleva 12%
	<b>1500</b>	<b>130,8</b>	<b>2,8%</b>	<b>Eleva 12%</b>
	3000	148,0	3,2%	Eleva 13%
IAF	1	134,0	2,9%	Eleva 12%
	<b>2,5</b>	<b>130,8</b>	<b>2,8%</b>	<b>Eleva 12%</b>
	3	142,1	3,1%	Eleva 14%
Profundidade máxima da raiz	10	308,6	6,7%	Satura
	20	165,3	3,6%	Eleva 14%
	<b>40</b>	<b>130,8</b>	<b>2,8%</b>	<b>Eleva 12%</b>
	80	113,5	2,5%	Eleva 10%
	160	0,0	0,0%	Não varia

## 5.2.4 Alteração dos dados climáticos

### 5.2.4.1 Clima tropical úmido

A TAB. 5.5 apresenta as mesmas alternativas do estudo de caso, porém para dados climáticos de um município de clima tropical úmido com pluviometria média anual de 2.139 mm e bem distribuída ao longo do ano. Os resultados indicam que somente os sistemas com espessuras maiores de 4 m conseguem conter a infiltração proveniente da elevada taxa de precipitação. Optou-se pela alternativa 3 proposto por Ribeiro (2011), considerando que barreira capilar não é indicada para climas com grande volume de chuvas e que o sistema convencional, mesmo menos espesso, apresenta dificuldade de execução muito maior devido à necessidade de compactação do solo argiloso.

### 5.2.4.2 Clima semi-árido

A TAB. 5.6 apresenta as mesmas alternativas do estudo de caso, porém para dados climáticos de um município de clima semi-árido com pluviometria média anual de 524 mm e concentradas no período chuvoso. Mesmo não considerando a presença de vegetação, verifica-se que todas as alternativas de cobertura perdem água para o ambiente devido à taxa de evaporação ser superior à taxa de precipitação durante quase o ano todo. Portanto, optou-se pela barreira capilar por ser mais adequado a este tipo de clima.

TABELA 5.5 – Resultado da alteração para o clima tropical úmido.

Tipo de cobertura		Geometria proposta						Resultado VADOSE/W			Escolha de alternativa		
Sistema	Camadas	Alt.	Espessura da camada (m)				Infiltração		Análise do grau de saturação do rejeito	Infiltração aceitável	Menor espessura por tipo	Decisão final	
			Orgânico	Siltoso	Argiloso	Arenoso	Total	(mm)					(%)
Sem cobertura													
Sistema convencional	Barreira hidráulica	1	0,2	-	0,5	-	-	0,7	290,0	4,5%	Satura totalmente	-	-
		2	0,2	-	1,0	-	-	1,2	287,0	4,5%	Satura totalmente	-	-
		3	0,2	-	2,0	-	-	2,2	238,0	3,7%	Satura parcialmente	-	-
		4	0,2	-	4,0	-	-	4,2	196,0	3,1%	Satura parcialmente	X	X
Sistema evapotranspirativo	Monolítica	1	0,2	0,5	-	-	-	0,7	307,0	4,8%	Satura totalmente	-	-
		2	0,2	1,0	-	-	-	1,2	308,0	4,8%	Satura totalmente	-	-
		3	0,2	2,0	-	-	-	2,2	309,0	4,8%	Satura parcialmente	-	-
		4	0,2	4,0	-	-	-	4,2	210,0	3,3%	Eleva 20%	-	-
Sistema proposto por Ribeiro (2011)	Barreira capilar	1	0,2	0,5	-	0,4	-	1,1	305,0	4,8%	Satura totalmente	-	-
		2	0,2	1,0	-	0,4	-	1,6	306,0	4,8%	Satura totalmente	-	-
		3	0,2	2,0	-	0,4	-	2,6	305,0	4,8%	Satura totalmente	-	-
		4	0,2	4,0	-	0,4	-	4,6	0,0	0,0%	Não varia	X	X
Sistema proposto por Ribeiro (2011)	Armazenamento e liberação e barreira hidráulica	1	0,2	0,5	0,5	-	-	1,2	308,0	4,8%	Satura totalmente	-	-
		2	0,2	1,0	0,5	-	-	1,7	308,0	4,8%	Satura totalmente	-	-
		3	0,2	2,0	0,5	-	-	2,7	308,0	4,8%	Satura totalmente	-	-
		4	0,2	4,0	0,5	-	-	4,7	164,4	2,6%	Não varia	X	X

TABELA 5.6 – Resultado da alteração para o clima semi-árido.

Tipo de cobertura		Geometria proposta						Resultado VADOSE/W			Escolha de alternativa				
Sistema	Camadas	Alt.	Espessura da camada (m)				Total	Infiltração		Análise do grau de saturação do rejeito	Infiltração aceitável	Menor espessura por tipo	Decisão final		
			Orgânico	Argiloso	Arenoso			(mm)	(%)						
Sem cobertura													-	-	-
Sistema convencional	Barreira hidráulica	1	0,2	-	0,5	-	-	<b>0,7</b>	0,0	0,0%	Diminui 10%	X	X		
		2	0,2	-	1,0	-	-	<b>1,2</b>	0,0	0,0%	Diminui 10%	X			
		3	0,2	-	2,0	-	-	<b>2,2</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X			
		4	0,2	-	4,0	-	-	<b>4,2</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X			
Sistema evapotranspirativo	Monolítica	1	0,2	0,5	-	-	-	<b>0,7</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X	X		
		2	0,2	1,0	-	-	-	<b>1,2</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X			
		3	0,2	2,0	-	-	-	<b>2,2</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X			
		4	0,2	4,0	-	-	-	<b>4,2</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X			
Sistema proposto por Ribeiro (2011)	Barreira capilar	1	0,2	0,5	-	0,4	-	<b>1,1</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X	X		
		2	0,2	1,0	-	0,4	-	<b>1,6</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X			
		3	0,2	2,0	-	0,4	-	<b>2,6</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X			
		4	0,2	4,0	-	0,4	-	<b>4,6</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X			
Sistema proposto por Ribeiro (2011)	Armazenamento e liberação e barreira hidráulica	1	0,2	0,5	0,5	-	-	<b>1,2</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X	X		
		2	0,2	1,0	0,5	-	-	<b>1,7</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X			
		3	0,2	2,0	0,5	-	-	<b>2,7</b>	0,0	0,0%	Tende à diminuir	X			
		4	0,2	4,0	0,5	-	-	<b>4,7</b>	0,0	0,0%	Não varia	X			

### 5.3 Resultado da simulação de utilização de diferentes tipos de rejeito como material de construção de cobertura

As TAB. 5.7 e 5.8 apresentam os resultados das análises de utilização de diferentes tipos de rejeito brasileiro como material de construção de cobertura. Os rejeitos com granulometria predominantemente siltosa foram utilizados na camada de armazenamento e liberação (TAB 5.7). O underflow proveniente da ciclonagem do rejeito do processamento de fosfato foi utilizado como camada de barreira capilar por apresentar granulometria arenosa (TAB 5.8). Para permitir comparação com outros resultados e análise crítica do resultado, escolheu-se a alternativa 3 do sistema proposto por Ribeiro (2011) na análise numérica dos materiais siltosos e a alternativa 3 do sistema evapotranspirativo com barreira capilar.

TABELA 5.7 – Resultado das simulações da utilização dos rejeitos com granulometria siltosa como materiais de construção de camada de armazenamento e liberação.

Rejeito proveniente do processamento de:	Camada construída com o rejeito	Infiltração		Saturação do rejeito
		(mm)	(%)	
<i>REFERÊNCIA: Alternativa 3 do sistema proposto por Ribeiro (2011)</i>				
Minério de ferro	Armazenamento e liberação	130,8	2,8%	Eleva 12%
Bauxita	Armazenamento e liberação	11,3	0,2%	Não varia
Fosfato - Overflow	Armazenamento e liberação	9,7	0,2%	Não varia
Ouro	Armazenamento e liberação	73,5	1,6%	Eleva 7%
		0,9	0,0%	Não varia

TABELA 5.8 – Resultado da simulação da utilização do rejeito com granulometria arenosa como material de construção de barreira capilar.

Rejeito proveniente do processamento de:	Camada construída com o rejeito	Infiltração		Saturação do rejeito
		(mm)	(%)	
<i>REFERÊNCIA: Alternativa 3 do sistema evapotranspirativo com barreira capilar</i>				
Fosfato - Underflow	Barreira capilar	0,0	0,0%	Não varia
		69,8	1,5%	Eleva 6%

Os rejeitos com granulometria siltosa, quando utilizados como material de construção da camada de armazenamento e liberação, apresentaram valores de infiltração mais baixos do que o valor de referência. O rejeito com granulometria arenosa, quando utilizado como material de construção barreira capilar, apresentou valor mais elevado de infiltração. Ressalta-se que a análise da eficiência de um sistema de cobertura não se restringe a impedir a passagem de água e que estes resultados são de um caso específico e não devem ser tomado como regra geral, porém o rejeito pode ser explorado a partir de suas características em diferentes camadas e geometrias.

Os resultados indicam que, dentro das premissas assumidas nessa dissertação, os rejeitos possuem características geotécnicas que possibilitam a utilização destes como material de construção de cobertura de reservatórios.

## 6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento desta dissertação permite concluir que o dimensionamento de sistemas de cobertura com solo aplicado ao fechamento de barragens para disposição de resíduos de mineração é complexo, multidisciplinar, necessita de uma grande quantidade de dados de entrada, de um programa para realização de análises numéricas e de uma metodologia que deve ser criteriosa.

Verificou-se uma grande dificuldade na obtenção de todos os parâmetros de entrada necessários, sejam eles geotécnicos, geoquímicos, climáticos, térmicos ou de vegetação referentes aos materiais de construção da cobertura e às condições de contorno da análise. Eles podem ser obtidos por estações meteorológicas, ensaios de laboratório, estimados a partir de outros parâmetros por meio de metodologias consagradas ou recomendados pela literatura.

O estudo de caso permite sugerir que:

- A partir dos resultados das análises numéricas foi proposta uma metodologia para seleção das alternativas de coberturas para reservatórios de rejeito sendo esta estabelecida por 3 etapas. Na primeira etapa são eliminadas as alternativas que ultrapassam a taxa de infiltração máxima aceitável para o projeto e/ou que geram variação no grau de saturação do rejeito. Na segunda etapa da seleção, para cada tipo de sistema de cobertura, prossegue somente a alternativa de menor espessura, considerando que a mesma atende o critério de projeto e necessita de uma menor quantidade de material de construção. A etapa final definirá a melhor alternativa da etapa anterior a partir da análise técnica e econômica. A análise técnica envolve o estudo da disponibilidade de material de construção e o estudo da alternativa mais adequada às condições climáticas locais. A análise econômica engloba todos os custos para construção da solução final;
- As alternativas geométricas analisadas englobam os principais tipos de camada, tipos de sistemas de cobertura e tipos de materiais em solo para os tipos de clima mais comuns no Brasil;
- A taxa de infiltração proveniente da precipitação e que atinge o rejeito é apenas um das respostas do estudo do desempenho de um sistema de cobertura, que

deve ser realizado acompanhado do balanço hídrico do sistema e do perfil de saturação ao longo do tempo.

A análise de sensibilidade permite sugerir que:

- Ao se alterar o período da análise para 5 anos, verifica-se o aumento do valor da infiltração para o rejeito e do grau de saturação deste material, porém a porcentagem da infiltração em relação ao novo total de precipitação diminui;
- Ao se alterar os métodos de obtenção ou de tratamento dos parâmetros e comparar com um valor de referência verificou-se:
  - Quando todos os dados climáticos são obtidos a partir de dados mensais e divididos em médias diárias, a infiltração apresentou maior valor. Porém, quando os dados de pluviometria são os dados reais diários e os demais são mensais divididos em médias diárias, a infiltração reduziu. Esta análise permite verificar a influência da obtenção dos dados climáticos no resultado final e concluir que os dados climáticos devem, preferencialmente, ser obtidos de leituras diárias de estações meteorológicas;
  - Ao se optar pela radiação solar calculada pelo programa, verifica-se uma pequena variação do valor da infiltração quando comparado com a condição de referência. Conclui-se que, caso não se tenha os dados de radiação solar reais, a estimativa pelo programa apresenta valores com pequenos desvios;
  - O valor de  $M_v$  conforme recomendado pelo VADOSE/W e o valor obtido pelo ensaio de adensamento realizado em laboratório geraram o mesmo valor de infiltração para a argila, porém, a alteração de apenas um dos materiais do sistema de cobertura não permite avaliar a influência no resultado final. Não foram encontrados valores típicos de  $M_v$  na literatura para variação e verificação da real sensibilidade do programa a esta faixa, entretanto elevou-se o valor de  $M_v$  em até 100 vezes permitindo a comprovação de que até este valor, nenhuma curva de retenção de umidade de nenhum dos materiais envolvidos sofreu variação;

- Quando se obteve a curva de retenção de umidade de todos os materiais envolvidos a partir da curva granulométrica pelo método de Aubertin et al. (2003), a infiltração apresentou variação. Esta estimativa pode ser uma ferramenta bastante útil durante as fases preliminares de um projeto, porém não se deve substituir os ensaios necessários para obtenção de dados mais realistas;
  - Ao alterar o modelo de Fredlund et al. (1994) para o modelo de Van Genuchten (1980) para a obtenção da curva de permeabilidade não saturada dos materiais verificou-se um aumento da infiltração, portanto a escolha do método de determinação da curva de permeabilidade influencia o resultado;
  - Quanto à alteração os parâmetros térmicos como uma função de teor de umidade volumétrico, verificou-se uma pequena diferença em relação à utilização de valores constantes. Portanto, a escolha do método não influencia o resultado deste estudo;
  - O IAF nulo durante os períodos de seca, conforme estimado pelo programa, pode não condizer com a realidade das espécies vegetais de clima tropical. Ao adotá-lo, verificou-se um aumento significativo da infiltração devido à redução da transpiração nestes períodos;
  - Ao se optar pela distribuição retangular das raízes em vez de triangular, o resultado sofre um desvio muito pequeno;
  - Na análise que desconsidera a presença de espécies vegetais, a infiltração aumentou e o rejeito abaixo da cobertura saturou confirmando a importância da vegetação.
- A variação da magnitude dos parâmetros permite concluir:
- Os valores inicialmente propostos para o nível d'água, para o espaçamento da malha de elementos finitos e para os parâmetros térmicos são aceitáveis e podem servir de referência para o dimensionamento de sistemas de cobertura;
  - O ponto de murcha inicialmente utilizado também pode ser utilizado, porém os demais parâmetros da vegetação devem ser estudados para cada caso. O IAF e a profundidade da raiz devem ser escolhidos cuidadosamente de forma a se aproximar ao máximo da condição real de

campo, considerando a alta influência destes no dimensionamento. Sugere-se levantamento das características das espécies vegetais existentes, realização de teste de campo e participação de biólogos na definição destes parâmetros.

- Cada clima analisado apresentou uma alternativa diferente, confirmando que as coberturas devem se adequar às características climáticas.

A simulação de utilização de diferentes tipos de rejeito como material de construção de cobertura permite sugerir que:

- Dentro das premissas assumidas nessa dissertação, os rejeitos possuem características geotécnicas que possibilitam a utilização destes como material de construção de cobertura de reservatórios;
- A utilização dos rejeitos como material de construção de cobertura pode ser considerada trazendo benefícios ambientais e econômicos;
- O dimensionamento de sistemas de cobertura com a utilização de rejeitos pode ser realizado conforme metodologias já consolidadas de coberturas com solos. Porém, a utilização de rejeito conduz como peculiaridade a necessidade de análise prévia de viabilidade técnica e econômica do material. As seguintes etapas são propostas e devem ser realizadas antes do dimensionamento da cobertura:
  - Análise do comportamento geoquímico do material;
  - Análise dos parâmetros geotécnicos do material;
  - Análise de viabilidade econômica.

## **6.1 Limitações**

- ✓ Não foram realizadas calibrações do modelo numérico com resultados de monitoramento de campo e de laboratório;
- ✓ Não foram consideradas as alterações que a presença das raízes das espécies vegetais pode causar nas propriedades dos materiais que ela atinge;
- ✓ Não foram realizadas análises dos custos de construção dos sistemas de coberturas estudadas.

## **6.2 Sugestões de trabalhos futuros**

Seguem sugestões de trabalhos futuros:

- Execução de células teste com rejeito ou mistura de rejeito com outro solo como material de construção de uma cobertura para análise da viabilidade e eficiência;
- Utilização de ensaio de coluna para calibração do modelo para as condições de campo;
- Estudar o efeito da histerese nas curvas de retenção de umidade do solo e rejeitos usados como cobertura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AACHIB, M. *Étude en laboratoire de la performance des barrières de recouvrement constituées de rejets miniers pour limiter le DMA*. 1997. 298p. Tese (doutorado), Département de Génie Minéral, École Polytechnique de Montréal, Montreal, 2011.
- 2 ABICHOU, T.; LIU, X.; TAWFIQ, K. *Design of Cost Effective Lysimeters for Alternative Landfill Cover Demonstrations Projects FAMU*. FSU College of Engineering State University System of Florida, Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, University of Florida, USA, 2004, 88 p.
- 3 AITCHISON, G. D. Review panel statement: Engineering concepts of moisture equilibria and moisture changes in soils. In: CONFERENCE ON MOISTURE EQUILIBRIA AND MOISTURE CHANGES IN SOIL BENEATH COVERED AREAS, 1, 1965, London, England. Proceedings... London: Butterworths, 1965, p. 7-21.
- 4 ALBRIGHT W. H.; BENSON, C. H.; WAUGH, W. J. *Water balance covers for waste containers: principles and practices*. American Society of Civil Engineering (ASCE), 2010, 145 p.
- 5 ALONSO, E. E.; GENS, A.; HIGHT, D. W. Special problems soils, In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, X. 1987, Dublin, Ireland. Proceedings... Dublin, General Report, 1987. Session 5, p. 5.1-5.60.
- 6 AMORIM, N. R. *Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na Mina Rio Paracatu Mineração (RPM)*. 2008. 143 p. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação*. Rio de Janeiro, 2004a.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004b.

- 9 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10006*: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.
- 10 AUBERTIN, M.; MBONIMPA, M.; BUSSIÈRE, B.; CHAPUIS, R. P. A physically-based model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*. 2003.
- 11 BENSON C. *Prediction in Geoenvironmental Engineering*: Recommendations for Reliable Predictive Modeling. GeoFlorida, 2010, p. 1-13.
- 12 BENSON, C.; SAWANGSURIYA, A.; TRZEBIATOWSKI, B.; ALBRIGHT, W. Post construction changes in the hydraulic properties of water balance cover soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133 (4), p. 349-359, 2007.
- 13 BENSON, C. H.; KHIRE, M. V. Earthen covers for semiarid and arid climates, *Landfill Closures – Environmental Protection and Land Recovery*, ASCE, *Geotechnical Special Publication*, No. 53, R. Jeffrey Dunn and Udai P. Singh, Eds., New York, USA, p. 201-217, 1995.
- 14 BENSON, C.; BOSSCHER, P.; LANE, D.; PLISKA, R. Monitoring system for hydrologic evaluation of landfill final covers. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 17 (2), p.138–149, 1994.
- 15 BITTAR, R. J. *Caracterização tecnológica de rejeitos de fosfato e análises de estabilidade da barragem de rejeitos B5 da Bunge Fertilizantes S/A*. 2006. 257 p. Dissertação (mestrado), Programa de Pós-Graduação, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- 16 BLIGHT, G. E. Aspects of capillary model of unsaturated soils. In: ASIAN REGIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 7, 1983, Israel, Haifa. Proceedings... Haifa, 1983. Vol 1, p. 1-7.
- 17 BOHNHOFF, G.; OGORZALEK, A.; BENSON, C.; APIWANTRAGOON, P. Comparison of field data and water balance predictions for a monolithic cover in a semi-arid climate. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 135 (3), p. 333-348, 2009.

- 18 CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The filter paper method of suction measurement, *Geotechnique*, Vol. 36 (2), p. 265-268, 1986.
- 19 DE CAMPOS, T. M. P. Equipamentos e técnicas para a determinação da sucção no campo. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS (ÑSAT'94), 2, 1994, Recife. Anais... Recife: AMSF(UFPE)/ABMS-NE, 1994. p. 9-18.
- 20 DE VRIES, A. Thermal properties of soils. In: THE PHYSICS OF PLANT ENVIRONMENT, 1963, Amsterdam. W. R. Van Wijk (ed.), North Holland Pub. Co., 1963, 382 p. 1963;
- 21 DOBCHUK, B. S.; WILSON, W. G.; AUBERTIN, M. Evaluation of a single-layer desulphurized tailings cover. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE, 6, Cairns, Australia, 2003.
- 22 EDIL, T. B.; MOTAN, S. E.; TOHA, F. X. *Mechanical behavior and testing method of unsaturated soils: Lab Shear Strength of Soils*, 1981.
- 23 EPA - Environmental Protection Agency. *Field applications of in situ remediation technologies: permeable reactive barriers*. EPA/542/R-99/002, Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, USA, 1999, 114 p.
- 24 EPA - Environmental Protection Agency. *Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers*. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, USA, 2002.
- 25 ESPÓSITO, T. J. Metodologia probabilística e observacional aplicada à barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico. 2000. 363 p. Tese (doutorado), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.
- 26 FAGUNDES, J. R. T. *Balanço hídrico do bota-fora BF4 da Mina Osamu Utsumi, INB, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida*. 2005. 121 p. Dissertação (mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- 27 FINES, P.; WILSON, W. G. *Laboratory evaluation of co-mixed tailings waste rock and slag for the construction of barrier cover systems at Copper Cliff*. University of British Columbia & Golder Paste Technology, Canada, 2002, 21 p.

- 28 FONSECA, R. F.; ABBADE, P. U. B.; VILLAR, L. F. S. Caracterização microscópica e avaliações reológicas de pasta de rejeito de minério de ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), XVI, Porto de Galinhas/PE, 2012.
- 29 FREDLUND D. G.; RAHARDJO H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, USA, 1993, 517 p.
- 30 FREDLUND, D. G. Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 16 (1), p. 121-139, 1979.
- 31 FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.103, n. GT5, p. 447-466, 1977.
- 32 FREDLUND, D. G.; XING A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, p. 521-532. 1994.
- 33 FREDLUND, D.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil – water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 31, p. 533-546. 1994.
- 34 GARD/INAP. *Global Acid Rock Drainage Guide*. The International Network for Acid Prevention. <http://www.gardguide.com> Acesso em 3 de maio de 2012.
- 35 GEO-STUDIO. *Vadose zone modeling with VADOSE/W 2007*. GEO-SLOPE International Ltd. Third Edition, 2008.
- 36 INMET. *Instituto Nacional de Meteorologia*. <http://www.inmet.gov.br/> Acesso em 3 de maio de 2012.
- 37 ITRC - Interstate Technology & Regulatory Council. *Technical and regulatory guidance for design, installation, and monitoring of alternative final landfill covers*. Alternative Landfill Technologies Team, 2003, 125 p.
- 38 JOHANSEN, O. *Thermal conductivity of soils*. Ph. D. Thesis, University of Trondheim, Norway, 1975.
- 39 JUNQUEIRA, F. F.; VILLEFORT, L. F. C.; MAFRA, J. M. Avaliação da utilização de sistemas de cobertura de solos aplicados ao fechamento de minas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 7, Belo Horizonte, 2011a.

- 40 JUNQUEIRA, F. F.; SANIN, M. V.; SEDGWICK, A.; BLUM, J. Assessment of water removal from oil sands tailings by evaporation and under-drainage, and the impact on tailings consolidation. In: PROCEEDINGS TAILINGS AND MINE WASTE, Vancouver, Canadá, 2011b.
- 41 JUNQUEIRA, F. F.; WILSON, G. W.; DUNLAP, S. The influence of climate, vegetation, layer thickness, and material properties for performance of the cover systems at the Golden Sunlight Mine. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE, 7, Saint Louis, USA, 2006.
- 42 KHIRE, M.; BENSON, C.; BOSSCHER, P. Water balance modeling of earthen final covers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.*, Vol. 123 (8), p. 744–754, 1997.
- 43 KOVÁCS, G. *Seepage Hydraulics*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Holanda, 1981.
- 44 LAMBE, T. W.; WITHMAN, R. V. *Soil mechanics*, SI Version. John Wiley & Sons, USA, 1969.
- 45 LANGONI, G. *Feasibility of Evapotranspiration Covers for Florida Landfills*. M. S. Thesis, Florida State University, USA, 2002, 100 p.
- 46 LAWRENCE, R. W.; WANG, Y. Determination of neutralization potencial in the prediction of acid rock drainage. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE, 4, Vancouver, Canadá, 1997.
- 47 LOPES, M. B. L. Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG. 2006. 175 p. Dissertação (mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- 48 MARINHO, F. A. M. Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados. 2005. 200 p. Texto apresentado para o concurso de livre-docência na especialidade geomecânica, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- 49 MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS (ÑSAT'97), 3, 1997, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, 1997. vol. 2, p. 373-398.

- 50** MISKOLCZI, J.; WILSON, G. W. Construction, instrumentation and monitoring of a field-scale experiment for evaluating the performance of paste rock covers in Copper Cliff, ON. *Geotechnical News*, June 2007, p. 31-34, 2007.
- 51** MORRIS C. E.; STORMONT, J. C. Capillarity barriers and subtitle D covers: estimating equivalency. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, N. 1, p. 3-10, 1997.
- 52** NYHAN, J. W., HAKONSON, T. E; DRENNON, B. J. A water balance study of two landfill cover designs for semiarid regions. *Journal of Environmental Quality* Vol. 19, N° 2, p. 19:281- 288, 1990.
- 53** OGORZALEK, A.; BOHNHOFF, G.; SHACKELFORD, C.; BENSON, C.; APIWANTRAGOON, P. Comparison of field data and water balance predictions for a capillary barrier cover. *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*. Vol. 134 (4), p. 470-486, 2008.
- 54** PENMAN, H. L. *Natural evapotranspiration from open water, bare soil and-grass*. Proceedings of the Royal Society A. London, 193, 1948, p. 120-145.
- 55** PINHEIRO, R. J. B.; SILVA, C. F.; MALLMANN, K.; SOMAVILA, L. Ensaio de coluna em solo arenoso fino para avaliar a utilização em camada de retenção e filtração de cargas orgânicas e inorgânicas do lixiviado do Aterro Sanitário de Santa Maria (RS). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 7, Belo Horizonte, 2011.
- 56** QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. *Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction*. Michigan Department of Environmental Quality, Waste Management Division, USA, 2002, p. 399-437.
- 57** REICHARDT, K.; TIMM, L.C. *Solo, planta e atmosfera. Conceitos, processos e aplicações*. Manole, Barueri, SP, 2004.
- 58** REIS, M. S.; OLIVEIRA FILHO, W. L.; MASETTI, L.; SOUZA, T. S. C. Utilização de rejeitos e estéreis de mineração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 7, Belo Horizonte, 2011.
- 59** RIBEIRO, A. G. C. *Metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura com base em estudo de caso realizado na mina da empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu, Minas Gerais*. 2011. 161 p. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

- 60 RIBEIRO, V. Q. F.; VILLAR, L. F. S. V.; MENDONÇA, A. A.; CAMPOS, T. M. P. Determinação de parâmetros geotécnicos não saturados de um solo residual compactado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), XVI, Porto de Galinhas/PE, 2012.
- 61 RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*. Vol 1, p. 318-333, 1931.
- 62 RIDLEY, A. M.; WRAY, W. K. Suction measurement: a review of current theory and practices, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS (UNSAT'95), 1, 1995. Paris, France. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema; Paris: Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995. v.3, p. 1293-1322.
- 63 SCANION, B.; CHRISTMAN, M.; REEDY, R.; GROSS, B. (2003). Intercode comparison for simulating water balance in an engineered cover. In: INTERNATIONAL APPLIED PHYTOTECNOLOGIES CONFERENCE. Chicago, USA, 2003.
- 64 SENGUPTA, M. *Environmental impacts of mining: Monitoring, restoration, and control*. Lewis Publishers, 1993, 512 p.
- 65 SOILCOVER. *SoilCover user's manual*. University of Saskatchewan, 2000.
- 66 THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. Designing and managing unpaved opencast mine haul roads for optimum performance. In: ENCONTRO ANUAL SME, Denver, USA, 1999.
- 67 TIMMS, G. P.; BENNET, J. W. The effectiveness of covers at rum jungle after fifteen years. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE, 5, Denver, USA, 2000.
- 68 UBALDO, M. O.; BORMA, L. S.; BARBOSA, M. C. *Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas*. Série gestão e planejamento ambiental, Artigo técnico n° 2, Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral / Ministério da Ciência e Tecnologia, 2007. 51 p.
- 69 VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 44, p. 892-898, 1980.

- 70 VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Geotechnique*, Vol. 49, p. 143-159, 1999.
- 71 VIEIRA, A. M. *Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos*. 2005. 265 p. Tese (doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- 72 VILLAR, L. F. S. *Estudo de adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita*. 2002. 511 p. Tese (doutorado), Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- 73 WEEKS, B.; WILSON, G. W. Variations in moisture content for a soil cover over a 10-year period. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, p. 1615, 2005.
- 74 WICKLAND, B.; WILSON, G. W.; WIJEWICKREME, D. Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 43, p. 928-945, 2006.
- 75 WILSON, G. W.; FREDLUND M. D. *The application of knowledge-based surface flux boundary modeling*. Unsaturated Soils for Asia. Toll & Leong. 2000, p. 451-456.
- 76 WILSON, G. W.; FREDLUND, D. G.; BARBOUR, S. L. Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, p. 151-161, 1994.
- 77 WILSON, G. W. *Soil Evaporation fluxes for geotechnical engineering problems*. 1990. 464 p. Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 1990.
- 78 WILSON, G. W.; WILLIAMS, D. J.; RYKAART, E. M. The integrity of cover systems – An update. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE, 6, Cairns, Australia, 2003. p. 12-18.
- 79 YANFUL, E. K.; MOUSAVI, S. M.; SOUZA, L. A numerical study of soil cover performance. *Journal of Environmental Management*, Vol. 81, p. 72-92, 2006.
- 80 YANFUL, E. K.; MOUSAVI, S. M.; YANG, M. Modeling and measurement of evaporation in moisture-retaining soil covers. *Advances in Environmental Research*, Vol. 7, p. 783-801, 2003.